

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна  
академія»  
Кафедра (автоматизації, метрології та енергоефективних технологій)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

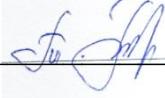
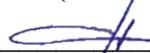
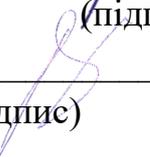
магістра

на тему

«Професійна підготовка фахівців інженерно-технічного центру до  
моделювання гідравлічного розриву пласта»  
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 курсу, групи ЗЕА-ПОНС24мг  
спеціальності: 015 Професійна освіта (Видобуток, переробка та  
транспортування корисних копалин)

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 / Євген ЛОБОДЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)  
Керівник  / Наталія АНТОНЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)  
Рецензент  / Олександр АЛЕКСАНДРОВ  
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри  / Геннадій КАНЮК  
(підпис) (ім'я та прізвище)  
Нормоконтроль  / Євген КЛЮЧКА  
(підпис) (ім'я та прізвище)  
Секретар ЕК  / Євген КЛЮЧКА  
(підпис) (ім'я та прізвище)

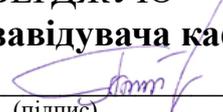
Харків – 2025 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. В.Н.**  
**КАРАЗІНА**

Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»  
Кафедра автоматизації, метрології та енергоефективних технологій  
Спеціальність 015.35 Професійна освіта (Видобуток, переробка та  
транспортування корисних копалин)  
Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Нафтогазова справа)»

ЗАТВЕРДЖУЮ

**В.о. завідувача кафедри**

  
\_\_\_\_\_

(підпис)

д.т.н., проф. Геннадій КАНЮК

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на кваліфікаційну роботу (дипломну роботу/дипломний проєкт)**

**другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу (ці) вищої освіти \_\_\_\_\_ Євген ЛОБОДЕНКО \_\_\_\_\_  
(ім'я, прізвище)

1. Тема «Професійна підготовка фахівців інженерно-технічного центру до моделювання гідравлічного розриву пласта» затверджена наказом по університету № 4801-5/3665 від 06.10.2025 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «10» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Закони України, Постанови Верховної Ради, Постанови Кабінету Міністрів, теоретичні та практичні розробки вітчизняних та зарубіжних авторів за темою роботи, періодичні видання, статистичні дані, галузева нормативна документація, технологічна документація.

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, що їх належить розробити): Актуальність професійної підготовки фахівців інженерно-технічного центру до моделювання гідравлічного розриву пласта. Науково-методичний аналіз розрахунку проєктного коефіцієнта видобування нафти та методів моделювання гідравлічного розриву пласта. Вимоги до кадрового забезпечення об'єкту галузі. Розробка дидактичного проєкту викладання теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта», що вивчається у процесі підвищення кваліфікації фахівців інженерно-технічного центру.

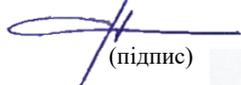
5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал): Презентація, виконана в програмі Microsoft PowerPoint

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	
1	д.пед.н., проф. Брюханова Н.О.			

7. Дата видачі завдання «01» вересня 2025 р.

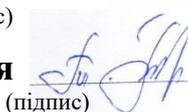
**Керівник роботи**

  
(підпис)

Наталія АНТОНЕНКО

(ім'я, прізвище)

**Завдання прийняв до виконання**

  
(підпис)

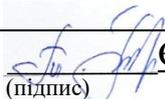
Євген ЛОБОДЕНКО

(ім'я, прізвище)

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК  
виконання кваліфікаційної роботи  
(дипломної роботи/дипломного проєкту)**

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Актуальність професійної підготовки фахівців інженерно-технічного центру до моделювання гідравлічного розриву пласта.	01.09.2025 – 15.09.2025	
2	Науково-методичний аналіз розрахунку проектного коефіцієнта видобування нафти та методів моделювання гідравлічного розриву пласта.	16.09.2025 – 05.11.2025	
3	Вимоги до кадрового забезпечення об'єкту галузі.	06.11.2025 – 15.11.2025	
4	Розробка дидактичного проєкту викладання теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта», що вивчається у процесі підвищення кваліфікації фахівців інженерно-технічного центру.	16.11.2025 – 29.11.2025	
5	Оформлення пояснювальної записки та презентації	До 10.12.2025	

**Здобувач (ка) вищої освіти**

  
(підпис)

Євген ЛОБОДЕНКО

(ім'я, прізвище)

**Нормоконтроль**

(підпис)

  
Євген КЛЮЧКА

(ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

до магістерської роботи на тему  
«Професійна підготовка фахівців інженерно-технічного центру до  
моделювання гідравлічного розриву пласта»  
Євген ЛОБОДЕНКО

Магістерська робота складається з 101 сторінка, 23 рисунків, 12 таблиць, список літератури містить 30 джерел.

ДИДАКТИЧНИЙ ПРОЄКТ, ПІДВИЩЕННЯ КВАЛІФІКАЦІЇ,  
ПРОФЕСІЙНА ПІДГОТОВКА, ГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРИВ ПЛАСТА,  
КОЕФІЦІЄНТ ВИЛУЧЕННЯ НАФТИ, ГЕОЛОГО-ТЕХНІЧНИЙ ЗАХІД

**Об'єкт дослідження** – процес професійної підготовки фахівців інженерно-технічних центрів нафтової промисловості, які виконують роботи з моделювання гідравлічного розриву пласта (ГРП) та оцінювання ефективності технологічних рішень у свердловинах.

**Предмет дослідження** – професійна підготовка інженерно-технічного персоналу до виконання високоточних розрахунків, моделювання та прогнозування результатів ГРП з урахуванням геологічних, гідродинамічних та технологічних параметрів.

У роботі обґрунтовано значущість як фахівців інженерно-технічного центру до моделювання гідравлічного розриву пласта. Проведено науково-методичний аналіз розрахунку проектного коефіцієнта видобування нафти та методів моделювання гідравлічного розриву пласта. Також сформовано та науково обґрунтовано комплекс вимог до кадрового забезпечення фахівців інженерно-технічних центрів нафтової промисловості, які виконують роботи з моделювання гідравлічного розриву пласта.

Розроблено дидактичний проєкт викладання теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта», що вивчається у процесі підвищення кваліфікації фахівців інженерно-технічного центру.

**ABSTRACT**  
of the master's thesis on the topic  
«Professional training of specialists at the engineering and technical centre  
for hydraulic fracturing modelling»  
Yevgeny LOBODENKO

The master's thesis consists of 101 pages, 23 figures, 12 tables, and a list of references containing 30 sources.

EDUCATIONAL PROJECT, ADVANCED TRAINING,  
PROFESSIONAL TRAINING, HYDRAULIC FRACTURING, OIL RECOVERY  
COEFFICIENT, GEOLOGICAL AND TECHNICAL MEASURE

The object of research is the process of professional training of specialists at engineering and technical centres in the oil industry who perform work on modelling hydraulic fracturing (HF) and evaluating the effectiveness of technological solutions in wells.

The subject of the study is the professional training of engineering and technical personnel to perform high-precision calculations, modelling and forecasting the results of HFR, taking into account geological, hydrodynamic and technological parameters.

The work substantiates the importance of high-quality specialists from engineering and technical centres for modelling hydraulic fracturing. A scientific and methodological analysis of the calculation of the design oil recovery factor and methods of hydraulic fracturing modelling has been carried out. A set of requirements for staffing engineering and technical centres in the oil industry that perform hydraulic fracturing modelling has also been developed and scientifically substantiated.

A didactic project for teaching the topic ‘Modelling of hydraulic fracturing’ has been developed, which is studied in the process of advanced training of specialists of the engineering and technical centre.

## ПОЗНАЧЕННЯ, ВИЗНАЧЕННЯ І СКОРОЧЕННЯ

**АВПТ** - аномально-високий пластовий тиск;

**АНПТ** - аномально-низький пластовий тиск;

**БД** - База даних;

**БФА** - блочно-факторний аналіз;

**ГДІ** - Гідродинамічні дослідження;

**ГДС** - Геофізичні дослідження свердловин;

**ГМПН** - гідродинамічні методи підвищення нафтовіддачі;

**ГРП** - Гідравлічний розрив пласта;

**ГТМ** - Геолого-технічні заходи;

**РР** - Рідина розриву;

**КВН** - Коефіцієнт вилучення нафти;

**КРС** - Капітальний ремонт  
свердловини;

**МЗН** - Метод збільшення нафтовіддачі;

**ПБФА** - проактивний блочно-факторний аналіз;

**ПЗП** - Привибійна зона пласта;

**ПЗ** - Програмне забезпечення;

**ПШТ** - Підтримка пластового тиску;

**ТР** - технологічний режим;

**ВДЗ** – важкодобувні запаси;

**РМБ** – рівняння матеріального балансу;

**ФЄС** - Фільтраційно-ємнісні властивості;

**ХВ** - Характеристика витіснення.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	10
РОЗДІЛ 1 .....	13
АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНОГО ЦЕНТРУ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРИВУ ПЛАСТА.....	13
1.1. Вимоги до професійної діяльності фахівців інженерно-технічного центру .....	13
1.2. Проблеми та суперечності в існуючій системі підготовки фахівців .....	14
1.3. Необхідність удосконалення професійної підготовки .....	15
1.4. Зарубіжний та вітчизняний досвід підготовки спеціалістів у сфері моделювання ГРП .....	18
Висновки до розділу 1 .....	22
РОЗДІЛ 2 .....	24
НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗРАХУНКУ ПРОЕКТНОГО КОЕФІЦІЄНТА ВИДОБУВАННЯ НАФТИ ТА МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРИВУ ПЛАСТА.....	24
2.1. Оцінка сучасних підходів до формування розрахунку проектного коефіцієнта винятку нафти.....	26
2.1.1 Аналіз методик розрахунку коефіцієнта вилучення нафти .....	26
2.2 Механізм впливу зміни гідропровідності пласта на формування коефіцієнта вилучення нафти .....	35
2.3 Застосування методу матеріального балансу до розрахунку коефіцієнта вилучення нафти.....	40
2.4 Обґрунтування застосування моделей на підставі технологічних показників гідравлічного розриву пласта на нафтових місцях .....	45
2.4.1 Сутність технології гідравлічного розриву пласта .....	45
2.5 Застосування різних методів моделювання гідравлічного розриву пласта у процесі виконання геолого-технічного заходу .....	50
2.6 Основні етапи проектування гідравлічного розриву пласта.....	65

2.7 Оцінка негативної тенденції проведення гідравлічного розриву .....	68
Висновок до розділу 2.....	71
РОЗДІЛ 3 ВИМОГИ ДО КАДРОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄКТУ ГАЛУЗИ .....	74
3.1 Вимоги до кадрового забезпечення фахівців інженерно-технічних центрів нафтової промисловості, які виконують роботи з моделювання гідравлічного розриву пласта. ....	74
3.1.1 Загальні вимоги до професійної підготовки.....	74
3.1.2 Вимоги до спеціалізованих знань і компетенцій .....	74
3.1.3 Вимоги до практичних навичок і програмного забезпечення.....	75
Вимоги до міждисциплінарної взаємодії.....	75
3.1.4 Вимоги до підвищення кваліфікації та професійного розвитку .....	76
Висновок до розділу 3.....	76
РОЗДІЛ 4 .....	77
РОЗРОБКА ДИДАКТИЧНОГО ПРОЄКТУ ВИКЛАДАННЯ ТЕМИ «МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРИВУ ПЛАСТА», ЩО ВИВЧАЄТЬСЯ У ПРОЦЕСІ ПІДВИЩЕННЯ КВАЛІФІКАЦІЇ ФАХІВЦІВ ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНОГО ЦЕНТРУ .....	77
4.1. Вихідні дані.....	77
4.2. Види та зміст професійної діяльності фахівця.....	79
4.3. Кваліфікаційні вимоги до фахівців інженерно-технічного центру .....	80
4.4. Постановка цілей вивчення навчальної теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта».....	81
4.5. Перелік літературних джерел з теми.....	83
4.6. Конструювання дидактичних матеріалів з теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта».....	83
4.7. Аналіз базових умов навчання з теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта» .....	85
4.8. Проектування мотиваційних технологій навчання з теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта», характеристика і текст мотивації,	

використання якої доцільно при викладанні навчального матеріалу (табл. 4.5).....	87
4.9. Проектування технології формування орієнтовної основи діяльності при вивченні теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта» (табл. 4.6).....	88
4.10. Проектування технології формування виконавчих дій при вивченні теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта» (табл. 4.7).....	89
4.11. Проектування контрольних дій з теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта» (таблиця 4.8).....	92
4.12. Розробка програми курсів підвищення кваліфікації викладання теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта» представлено в таблиці 4.9. .	93
4.13. Розробка сценарію заняття «Флюїди та технологічні параметри ГРП»	96
Висновки до розділу 4 .....	97
ВИСНОВОК.....	98
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	100

## ВСТУП

Сучасна нафтогазова промисловість стикається з постійним ускладненням технологічних процесів видобутку вуглеводнів, що зумовлює необхідність використання передових методів інтенсифікації продуктивності свердловин. Одним із ключових інструментів підвищення ефективності видобутку є гідравлічний розрив пласта (ГРП), точне моделювання якого дозволяє оптимізувати обсяг продукції та знизити ризики техногенних пошкоджень. Водночас ефективність і безпека застосування цієї технології безпосередньо залежать від компетентності інженерно-технічного персоналу, здатного здійснювати високоточне моделювання, прогнозування результатів та приймати обґрунтовані рішення щодо режимів проведення робіт.

Актуальність дослідження визначається потребою в удосконаленні професійної підготовки фахівців інженерно-технічних центрів, що забезпечує комплексне розуміння гідродинамічних процесів, властивостей гірських порід, механіки руйнування пласта та сучасних цифрових технологій моделювання. Існуючі освітні програми часто не відповідають сучасним технологічним викликам, обмежуючи практичну підготовку інженерів та інтеграцію міждисциплінарних знань, що створює ризики помилок у процесі проектування та проведення ГРП.

Отже, розвиток системи професійної підготовки, орієнтованої на формування аналітичних, цифрових і практичних компетентностей фахівців, стає невід'ємною умовою підвищення ефективності та безпеки технологічних операцій у нафтогазовому секторі. Це визначає наукову та практичну значущість дослідження та потребу у розробці методичних і дидактичних підходів для підготовки висококваліфікованих фахівців інженерно-технічних центрів.

**Об'єкт дослідження** – процес професійної підготовки фахівців інженерно-технічних центрів нафтової промисловості, які виконують роботи з

моделювання гідравлічного розриву пласта (ГРП) та оцінювання ефективності технологічних рішень у свердловинах.

**Предмет дослідження** – професійна підготовка інженерно-технічного персоналу до виконання високоточних розрахунків, моделювання та прогнозування результатів ГРП з урахуванням геологічних, гідродинамічних та технологічних параметрів.

**Мета дослідження** – теоретично обґрунтувати та розробити ефективну систему підготовки фахівців інженерно-технічного центру, спрямовану на формування компетентностей, необхідних для точного моделювання процесів гідравлічного розриву пласта, аналізу результатів та прийняття обґрунтованих інженерних рішень.

**Гіпотеза дослідження.** Професійна підготовка інженерів забезпечить високу якість моделювання та обґрунтованість проектних рішень, якщо:

– навчальний курс включатиме глибоке вивчення фізико-хімічних процесів, особливостей пористих середовищ, механіки руйнування пласта та технологій ГРП;

– буде інтегровано міждисциплінарні знання з гідродинаміки, матеріалознавства, геології, промислової безпеки та цифрового моделювання;

– застосовуватимуться практикоорієнтовані методики навчання, включаючи роботу з комп'ютерними симуляторами, аналіз реальних виробничих кейсів та тренінги з прийняття інженерних рішень.

**Завдання дослідження:**

1. Проаналізувати професійну діяльність фахівців інженерно-технічних центрів, що виконують моделювання ГРП.

2. Визначити компетентнісні вимоги до інженерів, які займаються проектуванням та оцінкою ефективності гідравлічного розриву пласта.

3. Обґрунтувати зміст, структуру та методи професійної підготовки інженерів у сфері моделювання та прогнозування ГРП.

4. Розробити програму підвищення кваліфікації з урахуванням технологічних, аналітичних, нормативних і безпекових аспектів інженерної діяльності.

**Методи дослідження:** аналіз нормативно-технічної документації та стандартів ГРП; порівняльний аналіз навчальних програм суміжних інженерних дисциплін; експертні опитування інженерів та технологів; розбір кейсів реальних операцій ГРП; педагогічне моделювання та розробка дидактичних систем навчання; узагальнення практичного досвіду роботи інженерних підрозділів.

**Наукова новизна дослідження** полягає у комплексному обґрунтуванні системи професійної підготовки фахівців інженерно-технічного центру до моделювання ГРП, що поєднує технічні, аналітичні, цифрові та безпекові компетентності.

**Практична значущість дослідження:** розроблена система підготовки може бути впроваджена у програми підвищення кваліфікації та професійного розвитку інженерів, що дозволить підвищити точність моделювання, знизити ризики технологічних помилок і оптимізувати процеси проведення ГРП.

Структура магістерської роботи: робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і списку використаних джерел.

# РОЗДІЛ 1

## АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНОГО ЦЕНТРУ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРИВУ ПЛАСТА

### **1.1. Вимоги до професійної діяльності фахівців інженерно-технічного центру**

Професійна діяльність фахівців інженерно-технічного центру, які займаються моделюванням гідравлічного розриву пласта (ГРП), має низку специфічних особливостей. Основна задача таких фахівців полягає у плануванні, проведенні та контролі процесів ГРП з урахуванням геологічних, гідродинамічних і технологічних факторів, що впливають на ефективність видобутку та безпеку робіт.

Компетентнісний профіль інженера-експерта включає комплекс знань, умінь та практичних навичок, необхідних для виконання високотехнологічних завдань. До них належать знання принципів гідродинаміки та механіки руйнування порід, розуміння методів моделювання та прогнозування поведінки пласта, вміння застосовувати цифрові платформи для розрахунків та аналізу результатів, а також навички оцінки ризиків і контролю за безпекою технологічних операцій.

Нормативно-технічне забезпечення діяльності фахівців визначається національними та міжнародними стандартами і регламентами, зокрема ISO, API та EN, що регламентують проведення ГРП, вимоги до проектування, експлуатації насосно-компресорного обладнання та систем моніторингу. Дотримання цих стандартів забезпечує безпеку робіт, ефективність впливу на пласт та мінімізацію екологічних ризиків.

Таким чином, професійна підготовка фахівців повинна враховувати специфіку технологічних процесів, формувати комплекс компетентностей, а

також забезпечувати знання сучасних стандартів і правил безпечного проведення ГРП.

## **1.2. Проблеми та суперечності в існуючій системі підготовки фахівців**

Сучасна система підготовки фахівців інженерно-технічних центрів у сфері гідравлічного розриву пласта має низку суттєвих проблем та суперечностей, що знижують її ефективність і відповідність вимогам промисловості. По-перше, освітні програми часто не відповідають сучасним технологічним викликам та швидкому розвитку цифрових методів моделювання, що обмежує здатність фахівців використовувати передові інструменти для прогнозування та контролю процесів ГРП.

По-друге, у підготовці недостатньо інтегровані міждисциплінарні знання, які є критично важливими для комплексного розуміння процесів: гідродинаміка, механіка руйнування порід, матеріалознавство, а також цифрові технології та програмне забезпечення для моделювання. Відсутність такої інтеграції знижує ефективність аналізу та прийняття рішень у складних виробничих ситуаціях.

По-третє, сучасні програми практичної підготовки не забезпечують достатнього рівня роботи з реальними кейсами, аварійними ситуаціями та нештатними режимами експлуатації, що обмежує здатність фахівців швидко реагувати на непередбачувані події та робити обґрунтовані інженерні висновки.

Отже, наявні прогалини у системі підготовки фахівців вимагають розробки оновлених методик навчання, які поєднуюватимуть теоретичні знання, міждисциплінарну інтеграцію та практикоорієнтовані модулі з використанням цифрових інструментів та реальних виробничих кейсів.

### **1.3. Необхідність удосконалення професійної підготовки**

Сучасна нафтогазова промисловість характеризується постійним розвитком технологій та ускладненням виробничих процесів. Особливо це стосується методів інтенсифікації видобутку, до яких належить гідравлічний розрив пласта (ГРП). Цей процес має складну багатофакторну природу, оскільки включає взаємодію гідродинамічних процесів у пористих середовищах, механічних властивостей порід, взаємодію хімічних речовин із пластоутворюючими породами та обладнанням свердловини. У зв'язку з цим професійна підготовка фахівців інженерно-технічного центру, відповідальних за моделювання ГРП, має бути комплексною, інтегрованою та орієнтованою на практичне відпрацювання високотехнологічних операцій.

Однією з ключових проблем існуючої системи підготовки фахівців є недостатня адаптація навчальних програм до сучасних технологічних викликів та цифрових інструментів. Традиційні методи навчання, засновані переважно на лекційних заняттях та класичних лабораторних роботах, не дозволяють повною мірою відпрацювати навички прогнозування та контролю результатів ГРП у реальному часі.

Сучасні методики навчання повинні включати інтеграцію комп'ютерного моделювання, віртуальних симуляторів, цифрових платформ та інтерактивних тренажерів. Це дозволяє слухачам відпрацьовувати сценарії проведення ГРП у безпечних умовах, моделювати вплив різних параметрів (тиску, витрати рідини, механічних властивостей порід) та оцінювати ймовірність виникнення аварійних ситуацій. Такий підхід не тільки підвищує технічну компетентність, але й формує критичне мислення щодо управління ризиками.

Впровадження сучасних методик включає також використання кейсів реальних виробничих ситуацій, де слухачі аналізують конкретні помилки та успіхи при проведенні ГРП, обґрунтовують свої дії та формулюють рекомендації для уникнення подібних помилок у майбутньому. Це дозволяє

поєднувати теоретичні знання з практичними навичками, що є критично важливим у професійній підготовці інженерів-експертів.

Важливим аспектом удосконалення професійної підготовки є активне використання практикоорієнтованих форм навчання. Лекційні заняття мають поєднуватися з лабораторними та практичними модулями, де слухачі можуть відпрацювати алгоритми моделювання ГРП, налаштування обладнання, розрахунок робочих параметрів та оцінку результатів експериментів.

Моделювальні лабораторії дозволяють створювати фізичні та цифрові аналоги пласта та свердловини, на яких можна відпрацьовувати сценарії ГРП. Це включає моделювання різних типів порід, умов проникнення рідини та формування тріщин. Використання таких лабораторій дозволяє слухачам оцінювати ефективність різних технологій ГРП, прогнозувати розподіл тиску та деформацій у пласті та приймати рішення щодо оптимізації параметрів операцій.

Крім того, доцільно застосовувати тренажери та інтерактивні модулі, які імітують нестандартні ситуації, наприклад, раптове збільшення тиску, підтікання рідин або зміни механічних властивостей порід. Практика на таких тренажерах формує у слухачів навички швидкого прийняття рішень та мінімізації ризиків.

Гідравлічний розрив пласта є складним процесом, що потребує глибокого аналізу великих обсягів даних: геологічних характеристик пласта, параметрів рідини, поведінки обладнання та результатів попередніх операцій. Тому цифрова компетентність є невід'ємною складовою професійної підготовки. Фахівці повинні вміти працювати з програмними комплексами для моделювання ГРП, системами збору та обробки даних у реальному часі, а також з алгоритмами прогнозування та оптимізації процесів.

Аналітичні навички дозволяють проводити коректну інтерпретацію даних моделювання, визначати критичні параметри, що впливають на ефективність і безпеку ГРП, та приймати обґрунтовані рішення щодо коригування технологічних режимів. Інтеграція цифрової та аналітичної

компетентності забезпечує можливість проведення гідравлічного розриву пласта з високою точністю та мінімізацією ризиків аварійних ситуацій.

Особлива увага у підготовці фахівців приділяється формуванню ризик-орієнтованого підходу. Процес ГРП пов'язаний із потенційними небезпеками для обладнання, персоналу та навколишнього середовища. Тому слухачі повинні навчитися оцінювати ймовірність виникнення аварійних ситуацій, розробляти превентивні заходи та алгоритми реагування на екстрені події.

Навчальні програми повинні включати аналіз інцидентів минулих операцій, моделювання аварійних ситуацій у безпечних умовах та розробку рекомендацій щодо їх запобігання. Таке навчання формує у фахівців не лише технічну експертизу, але й свідоме відношення до безпеки та охорони праці.

Для ефективного проведення ГРП необхідна інтеграція знань з різних галузей: гідродинаміки, механіки руйнування порід, матеріалознавства, хімії технологічних рідин, цифрових технологій та промислової безпеки. Існуючі освітні програми не завжди забезпечують таку інтеграцію, що призводить до розриву між теоретичними знаннями та практичними навичками.

Удосконалення професійної підготовки повинно включати комплексні курси та модулі, де слухачі одночасно аналізують фізичні процеси в пласті, моделюють взаємодію рідини та тріщин, оцінюють вплив матеріалів на ефективність ГРП та враховують нормативні вимоги і стандарти.

Впровадження модульної системи підготовки дозволяє адаптувати навчальний процес до рівня попередньої підготовки слухачів та специфіки їхньої професійної діяльності. Кожен модуль може включати теоретичні лекції, практичні лабораторні роботи, цифрове моделювання та тренажерні завдання. Такий підхід забезпечує поетапне формування компетентностей та можливість оцінки результатів навчання на кожному етапі.

Удосконалення професійної підготовки фахівців інженерно-технічних центрів є ключовою умовою підвищення безпеки та ефективності проведення гідравлічного розриву пласта. Необхідно впроваджувати сучасні методики навчання з використанням цифрових тренажерів і симуляторів,

моделювальних лабораторій та практикоорієнтованих завдань. Цифрова, аналітична та ризик-орієнтована компетентності фахівців повинні інтегруватися з міждисциплінарними знаннями у галузі гідродинаміки, механіки, матеріалознавства та промислової безпеки.

Такий підхід дозволяє не лише підвищити якість підготовки інженерів-експертів, а й знизити ймовірність аварійних ситуацій, оптимізувати процеси моделювання ГРП та забезпечити безпеку персоналу та навколишнього середовища. Комплексна модернізація системи навчання є стратегічно важливим напрямом для забезпечення сталого розвитку та інноваційного потенціалу нафтогазової галузі.

#### **1.4. Зарубіжний та вітчизняний досвід підготовки спеціалістів у сфері моделювання ГРП**

Моделювання та проведення гідравлічного розриву пласта є складним інженерним процесом, який потребує високої професійної компетентності інженерів-експертів. У зв'язку з цим питання підготовки кваліфікованих фахівців набуває стратегічного значення як для вітчизняних нафтогазових підприємств, так і для міжнародної практики. Досвід різних країн дозволяє виділити ефективні підходи, методи навчання та інструменти, що сприяють формуванню висококваліфікованого персоналу у сфері моделювання ГРП.

У світовій практиці підготовка інженерів у сфері ГРП здебільшого базується на комплексному поєднанні теоретичних знань, практичних навичок та цифрових інструментів. У США та Канаді існують спеціалізовані навчальні програми, що включають курси з гідродинаміки, механіки руйнування порід, матеріалознавства, інженерної геології та екології. Основна мета таких програм — не лише формування технічної компетентності, а й розвиток аналітичного мислення та навичок управління ризиками.

Велика увага приділяється практичній підготовці з використанням цифрових симуляторів, віртуальних лабораторій та моделювальних платформ.

Наприклад, у США широко застосовуються симулятори, що відтворюють процес формування тріщин у пласті, поведінку рідини та розподіл тиску у реальних умовах свердловини. Це дозволяє інженерам відпрацьовувати алгоритми проведення ГРП, аналізувати потенційні проблеми та розробляти превентивні заходи без ризику для обладнання та навколишнього середовища.

У країнах Близького Сходу, таких як Саудівська Аравія та ОАЕ, програми підготовки включають інтеграцію цифрових платформ з реальною експлуатаційною базою. Фахівці мають можливість працювати з даними свердловин та пласта в реальному часі, використовувати алгоритми прогнозування поведінки пласта після ГРП та моделювати вплив різних технологічних рідин на ефективність операції. Це сприяє формуванню не тільки технічних, а й управлінських компетенцій, необхідних для прийняття стратегічних рішень.

У Європі, зокрема у Великій Британії та Німеччині, акцент робиться на інтеграції міждисциплінарних знань. Підготовка включає модулі з матеріалознавства, гідродинаміки, комп'ютерного моделювання та промислової безпеки. Велика увага приділяється роботі з цифровими платформами, що дозволяють аналізувати великі обсяги даних, прогнозувати розвиток тріщин у пласті та оптимізувати параметри ГРП на основі математичних моделей та алгоритмів машинного навчання.

В Україні підготовка фахівців у сфері ГРП поки що поступається зарубіжному рівню у частині практичних навичок та використання цифрових технологій. Базова підготовка здійснюється у вищих технічних навчальних закладах, де основний акцент робиться на теоретичних аспектах гідродинаміки, механіки порід та обладнання свердловин. Практичні лабораторні роботи обмежуються класичними експериментами на фізичних макетах, що не дозволяє повною мірою відпрацьовувати сценарії проведення ГРП в реальних умовах.

Сучасні корпоративні навчальні центри великих нафтогазових компаній намагаються запроваджувати цифрові модулі, симулятори та інтерактивні

тренажери, проте їхнє застосування поки що носить фрагментарний характер. Найбільш поширеними є кейс-стаді на основі історичних даних та аналіз минулих операцій. Цього недостатньо для формування глибоких практичних навичок та розвитку аналітичного мислення фахівців, які працюють із складними гідравлічними системами.

Вітчизняна система підготовки також потребує інтеграції знань із суміжних дисциплін: матеріалознавства, цифрових технологій, аналізу даних та промислової безпеки. Без комплексного підходу та широкого використання сучасних цифрових платформ підготовка інженерів-експертів не відповідає вимогам сучасних технологій ГРП та не забезпечує високого рівня безпеки процесів.

Зарубіжний досвід демонструє ефективність використання цифрових платформ для моделювання ГРП. Основні переваги таких платформ включають:

1. Візуалізація процесів – цифрові симулятори дозволяють спостерігати розподіл тиску, розвиток тріщин та поведінку рідини у пористому середовищі в реальному часі.

2. Моделювання різних сценаріїв – можливість імітації різних параметрів свердловини, геології пласта та хімічних складів рідини дозволяє підготувати фахівців до нестандартних та критичних ситуацій.

3. Аналітика та прогнозування – цифрові платформи інтегруються з алгоритмами машинного навчання, що дозволяє передбачати ефективність операцій, оцінювати ризики та оптимізувати параметри ГРП.

4. Інтерактивні тренажери – відпрацювання практичних навичок у безпечних умовах та оцінка правильності рішень слухачів за допомогою автоматизованих систем контролю.

Використання таких інструментів у навчальному процесі дозволяє не лише підвищити технічну компетентність інженерів, а й формує аналітичне мислення та уміння працювати з великими масивами даних, що є критично важливим для ефективного моделювання та контролю ГРП.

Врахування зарубіжного досвіду дозволяє формувати комплексну систему підготовки фахівців у вітчизняних інженерно-технічних центрах. Основні напрямки адаптації включають:

1. Впровадження цифрових симуляторів та тренажерів – створення віртуальних лабораторій для моделювання процесів ГРП, відпрацювання алгоритмів управління та аналізу результатів.
2. Інтеграція міждисциплінарних знань – поєднання гідродинаміки, механіки, матеріалознавства та цифрових технологій у навчальних модулях.
3. Ризик-орієнтований підхід у підготовці – навчання оцінюванню потенційних загроз, розробці превентивних заходів та алгоритмів реагування на аварійні ситуації.
4. Використання кейс-стаді – аналіз реальних операцій ГРП, включаючи аварійні випадки, для формування практичних навичок прийняття обґрунтованих рішень.
5. Підвищення кваліфікації викладачів – залучення експертів, які пройшли міжнародні програми підготовки, для інтеграції сучасних методик у національні навчальні програми.

Адаптація зарубіжного досвіду має стратегічне значення для підвищення безпеки та ефективності проведення ГРП у вітчизняних умовах. Впровадження сучасних технологій навчання, цифрових платформ та тренажерів сприятиме формуванню компетентних фахівців, здатних прогнозувати та контролювати складні інженерні процеси, а також приймати своєчасні та обґрунтовані рішення у нестандартних ситуаціях.

Аналіз зарубіжного та вітчизняного досвіду підготовки фахівців у сфері моделювання ГРП показує, що найбільш ефективними є системи навчання, що поєднують теоретичну підготовку, практичні лабораторні роботи та використання цифрових платформ. Зарубіжні програми демонструють високу ефективність завдяки інтеграції міждисциплінарних знань, використанню симуляторів та тренажерів, аналітичних інструментів та ризик-орієнтованого підходу.

Вітчизняний досвід має потенціал для розвитку за рахунок адаптації кращих практик міжнародних програм, впровадження сучасних цифрових інструментів та створення модульних навчальних систем. Це дозволить підвищити професійну компетентність інженерів-експертів, забезпечити безпеку та ефективність проведення ГРП, а також сприяти інноваційному розвитку нафтогазової галузі в Україні.

## **Висновки до розділу 1**

1. Професійна підготовка фахівців інженерно-технічних центрів у сфері моделювання гідравлічного розриву пласта є надзвичайно актуальною у зв'язку зі складністю та високою технологічністю процесів ГРП, необхідністю забезпечення безпеки експлуатації свердловин та оптимізації продуктивності родовищ.

2. Аналіз професійної діяльності інженерів показав, що успішне моделювання ГРП потребує комплексних знань у галузях гідродинаміки, механіки руйнування пласта, матеріалознавства, цифрового моделювання та управління ризиками. Недостатній рівень підготовки може призводити до помилок у прогнозуванні поведінки пласта та негативно впливати на безпеку та ефективність робіт.

3. Існуючі освітні програми, як вітчизняні, так і міжнародні, демонструють різний рівень інтеграції практичних та цифрових компонентів навчання. Зарубіжний досвід підтверджує ефективність використання симуляторів, цифрових платформ та моделювальних лабораторій для формування практичних навичок та аналітичного мислення фахівців.

4. Вітчизняна система підготовки потребує модернізації шляхом впровадження інтегрованих навчальних модулів, цифрових тренажерів, практикоорієнтованих кейс-стаді та міждисциплінарних навчальних програм. Це дозволить підвищити рівень компетентності інженерів, забезпечити безпеку проведення ГРП та ефективне управління ресурсами родовищ.

5. Системний підхід до професійної підготовки, який поєднує теоретичну підготовку, цифрові симуляції, практичні лабораторні роботи та ризик-орієнтоване моделювання, є ключовим фактором формування висококваліфікованих фахівців, здатних приймати обґрунтовані рішення в умовах складних технологічних процесів та нестабільних геологічних параметрів.

6. Отже, вдосконалення системи підготовки фахівців інженерно-технічних центрів є необхідним для забезпечення безпеки, ефективності та інноваційного розвитку технологій гідравлічного розриву пласта в сучасних умовах нафтогазової галузі.

## РОЗДІЛ 2

### НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗРАХУНКУ ПРОЕКТНОГО КОЕФІЦІЄНТА ВИДОБУВАННЯ НАФТИ ТА МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРИВУ ПЛАСТА

Видобуток нафти та газу був і є однією з найважливіших сфер економіки країни. Зі збільшенням часу експлуатації нафтогазових родовищ проблема падіння коефіцієнта вилучення нафти (КВН) стає дедалі актуальнішою. Складність процесу видобутку вуглеводнів у тому, більшість родовищ мають низьку проникність і потребують спеціальних методів їхнього видобутку. Великі родовища знаходяться на завершальній стадії видобутку, а при інтенсивній розвідці нових нетрадиційних родовищ, включаючи запаси, що важко вилучаються (ВВЗ), необхідний комплексний підхід до розробки таких покладів і розвиток інноваційних технологій освоєння. У зв'язку з цим нафтогазова галузь зазнає глобальної технологічної модернізації на всіх етапах робіт.

Сучасне проектування розробки нафтових родовищ проводять з урахуванням математичного, геологічного і гідродинамічного моделювання пластів із розрахунку прогнозних показників розробки вуглеводневих пластів. Отримані математичні моделі покладів нафти мають показувати найбільш наближені до реальних геологічним умовам та технологічні параметри, які впливають процес розробки. З розрахункових результатів встановлюють проектне значення коефіцієнта вилучення нафти.

Моніторинг розробки родовища має складний комплексний характер, так як для постійного контролю цілого нафтового родовища потрібні сучасні програми з 2D (прокси) і 3D моделювання, що включають актуальні методи розрахунків та аналізу розробки родовища, а також

мають великі обчислювальні потужності і велику базу історичних даних. фізико-хімічні властивості пластового флюїду та геолого-технічні заходи (ГТЗ), що проводяться на родовищі. Тому основним напрямом розвитку програмних комплексів з моніторингу розробки родовищем є розвиток проактивного факторного аналізу об'єкта розробки, що охоплює всі необхідні етапи для виявлення проблемних ділянок, а також відстеження поточного коефіцієнта вилучення нафти та різницю із встановленими проектними значеннями.

Однак у ході видобутку фактичний показник КВН виявляється меншим, ніж проектний. Причиною такої відмінності є похибка розрахунку математичної моделі покладу, що складається з багатьох факторів, які програмний продукт не може врахувати. Оцінки запасів, наприклад, часто відрізнялися до і після проведення аналізу промислових досліджень, а часом різниця відрізнялася в 2-2,5 рази. Через це проявляється вагома похибка в оцінці КВН, пов'язаного з недостатністю інформації про розподіл запасів у об'єкті, що розробляється. До того ж важливо враховувати і зростання обводненості продукції, що видобувається на виснажуваних родовищах, що розробляються, тим самим вчасно оцінити те значення КВН, до якого можливо підняти або утримати за допомогою методів збільшення нафтовіддачі (МЗН) та інтенсифікації припливу, а також регулювання системи підтримки пластового тиску (ППТ). Найбільш популярною і поширеною технологією виклику додаткового припливу рідини з надр є гідравлічний розрив пласта (ГРП).

Це метод впливу на гірські породи, який був розроблений у 1940 році. Він полягає в тому, що під високим тиском у пласт вводиться рідина, що призводить до утворення тріщин та збільшення проникності породи. Перша операція була проведена в 1948 році, але спочатку мало було

відомо про механіку гірських порід та вплив робочих тисків на створювані тріщини. Ще з початку другої половини ХХ століття технологія ГРП у нафтовидобувній галузі виступила як один із важливих способів підвищення продуктивності свердловини, ефективності розробки родовищ та нафтовіддачі пласта.

Одним із важливих етапів проведення ГРП, яким займається сервісна компанія – проектування, де проводять розрахунки та створюють математичні моделі тріщини ГРП у спеціальних програмних продуктах. Від точності побудови дизайну тріщини ГРП та якості підрахунку необхідних параметрів залежить успішність та ефективність проведення ГРП. Інакше результати проведення ГРП можуть досягти розрахункових КВН, а найчастіше після ГРП - посилювати фактичний КВН.

## **2.1. Оцінка сучасних підходів до формування розрахунку проектного коефіцієнта винятку нафти**

### **2.1.1 Аналіз методик розрахунку коефіцієнта вилучення нафти**

Щоб оцінити ефективність системи розробки нафтового родовища, застосовують геолого-промисловий аналіз, що вивчає технологічні показники розробки. Такий безперервний процес дозволяє узагальнити проміжні результати для складання будь-якого проектного документа на розробку родовища, зокрема технологічні схеми розробки, проекти розробки або дорозробки. Одноманітність цих матеріалів з аналізу розробки родовищ вуглеводнів дають можливість об'єктивно порівняти технологічну ефективність вилучення запасів нафти з різних родовищ і покладів [1].

Сукупність таких способів аналізу, як оцінки енергетичного стану покладів, динаміки зміни обводненості продукції, що видобувається, характеру і ступеня вироблення запасів нафти та ефективності методів

підвищення продуктивності свердловин і збільшення нафтовіддачі пластів передбачають зіставлення динаміки технологічних показників розробки розглянутого родовища з аналогічним прикладом.

Технологічні показники покращують за допомогою зміни існуючої системи розробки або її вдосконалення, застосовуючи технології регулювання процесу експлуатації родовища. Найчастіше використовують гідродинамічні методи підвищення нафтовіддачі пластів (ГМПН), які збільшують як поточну нафтовіддачу пластів, і підвищувати кінцевий коефіцієнт вилучення нафти (КВН) [1].

Існують дві групи методів розрахунку технологічних показників розробки нафтогазових родовищ:

- Перша група включає екстраполяційні методи, до яких відносять характеристики витіснення (ХВ) – емпіричну залежність типу накопиченого видобутку нафти, тобто накопичений відбір рідини, і імітаційні моделі, побудовані за результатами багатофакторного аналізу. Причому ХВ показують реальні процеси вироблення запасів нафти та пов'язану з ним динаміку обводнення продукції при розробці неоднорідних пластів на режимі витіснення нафти водою;

- Друга група характеризує методи, що застосовують фізично змістовні математичні моделі процесу вилучення нафти з неоднорідних пластів – постійно діючі геолого-технологічні моделі, що мають початкові і граничні умови, а також являють собою систему диференціальних рівнянь, що відображають фундаментальні закони збереження маси, імпульсу, енергії, які з найбільшим об'ємом описують процес, що вивчається.

Що ж до коефіцієнта вилучення нафти – він дозволяє оцінити ефективність процесу видобутку нафти з надр і визначається різних етапах геологічного вивчення родовищ та його розробки. Для визначення цього показника необхідно враховувати нові перспективні методи розробки та

інтенсифікації видобутку нафти, які можуть бути застосовані на ділянці, що розглядається. Також важливим є моделювання варіантів процесу видобутку вуглеводнів з використанням програмних продуктів, які коректно відображають геолого-фізичні умови [2].

Якщо в середньому КВН на нафтогазових родовищах має діапазон від 20% до 35%, то запаси, що важко вилучаються, видають КВН до 10% [3]. На значення розрахункового КВП впливає режим роботи покладу, від якого залежить вибір способу розробки родовища та набору геолого-технічних заходів. Сам режим роботи покладу чутливий до ряду факторів, пов'язаних з аномально-низькими та високими пластовими тисками (АНПТ та АВПТ), фільтраційно-ємнісними властивостями пласта (ФЄП), а також з явищем депресійної вирви [4, 5].

Залежно від перерахованих вище та інших особливостей нафтогазових родовищ і стадій розробки при проведенні геолого-гідродинамічного моделювання, некоректність одержуваного прогнозованого КВН пов'язана з вибором використання методів розрахунку і прогнозу КВН.

Метод аналогій застосовується для попереднього визначення коефіцієнтів вилучення вуглеводнів на стадії пошуків та розвідки корисних копалин. У цьому методі використовують вже обґрунтовані розвіданому родовищ КВН, які мають схожі геолого-промислові показники [2].

Статистичні моделі створюються завдяки статистичним залежностям між КВН та геолого-технічними значеннями. Деякі автори статистичних методів оцінки КІН (Гомзіков і Молотов, Абасів і Султанов, Кожакін, Гутрі і Грінберг, Арпс) включають у кінцеву формулу КВН свої настановні коефіцієнти та параметри, деякі з яких вимагають додаткові розрахунки, збільшуючи тим самим загальну похибку обчислення КВН. Приклади

найпоширеніших статистичних формул визначення КІН представлені у табл.2.1 [2, 3, 6].

Таблиця 2.1

Статистичні методи розрахунку коефіцієнта вилучення нафти

В.К. Гомзіков та Н.А. Молотов	
Формула	Позначення параметрів
$\eta = 0,195 - 0,0078 \cdot \mu_o + 0,082 \cdot \lg K_{пр} + 0,0014 \cdot t + 0,0039 \cdot h + 0,180 \cdot K_{пес} - 0,054 \cdot Q_{вн.з} + 0,27 \cdot K_{н.н.} - 0,00086 \cdot S$ $Q_{вн.з} = \frac{Q_r}{Q}, \quad \mu_o = \frac{\mu_n}{\mu_v}$	<p><math>\eta</math> - ККВ (коефіцієнт корисного видобутку), безрозмірна величина;  <math>t</math> - пластова температура, °С;  <math>h</math> - середня нафтонасичена товщина, м;  <math>(Q_r)</math> - геологічні запаси водонафтової зони, т;  <math>Q</math> - запаси всієї залежі, т;  <math>K_{н.н.}</math> - нафтонасиченість, безрозмірна величина;  <math>\mu_n</math> - в'язкість пластової нафти, Па·с;  <math>\mu_v</math> - в'язкість води, Па·с;  <math>K_{пр}</math> - коефіцієнт проникності, Д;  <math>K_{пес}</math> - коефіцієнт піщанистості, безрозмірний;  <math>S</math> - густина сітки свердловин, га/свердловину.</p>
М.Т. Абасов та З.А. Султанов	
Формула	Позначення параметрів
$\eta = 0,153 + 0,053 \cdot T_H + 0,025 \cdot \ln K_{пр} - 0,0021 \cdot ((\eta_{бвс} - 19,9) \cdot (T_H - 5,59)) + 3,25 \cdot \left(\frac{1}{S} - 0,17\right)^2 S$	<p><math>\eta</math> - КВН, д.од.;  <math>\eta_{бвс}</math> - коефіцієнт безводної нафтовіддачі, д.од.;  <math>T_H</math> - середньорічний темп відбору нафти, д.од.;  <math>K_{пр}</math> - коефіцієнт проникності, Д;  <math>S</math> - щільність сітки свердловин, га/скв.;</p>
С.В. Кожакін	
Формула	Позначення параметрів

$\eta = 0,507 - 0,167 \cdot \lg \mu_o + 0,0275 \cdot \lg K_{пр} - 0,05 \cdot W_K + 0,0018 \cdot h + 0,071 \cdot K_{пес} - 0,000855 \cdot S$ <p>де <math>\mu_o = \frac{\mu_n}{\mu_B}</math></p>	<p><math>\eta</math> - КВН, д.од.;  <math>h</math> – середня нафтонасичена товщина, м; <math>\mu_n</math> – в'язкість пластової нафти, Па·с;  <math>\mu_B</math> - в'язкість води, Па · с;  <math>W_K</math> - Коефіцієнт варіації проникності, д.од.;  <math>K_{пес}</math> - коефіцієнт проникності, Д;  <math>K_{пес}</math> - коефіцієнт піщанистості, д.од.;  <math>S</math> – щільність сітки свердловин, га/скв.</p>
<p>Р. Гутрі та М. Грінберг</p>	
<p><b>Формула</b></p>	<p><b>Позначення параметрів</b></p>
$\eta = 0,11403 + 0,2719 \cdot \lg K_{пр} + 0,2556 \cdot (1 - K_{н.н.}) - 0,1355 \cdot \lg \mu_n - 1,538 \cdot K_{п} - 0,001144 \cdot h$	<p><math>\eta</math> - КВН, д.од.;  <math>h</math> – середня нафтонасичена товщина, м; <math>K_{н.н.}</math> - нафтонасиченість, д.од.;  <math>\mu_n</math> – в'язкість пластової нафти, Па·с;  <math>K_{пр}</math> - коефіцієнт проникності, Д;  <math>K_{п}</math> - коефіцієнт пористості, д.од.</p>
<p>Д. Арпс</p>	
<p><b>Формула</b></p>	<p><b>Позначення параметрів</b></p>
$\eta = 0,54898 \cdot \left( \frac{K_{пр} \cdot \mu_B}{B} \right)^{0,0422} \cdot (1 - K_{н.н.})^{-0,1903} \cdot \left( \frac{P_o}{P_k} \right)^{-0,2159} \cdot C$	<p><math>\eta</math> - КВН, д.од.;  <math>h</math> – середня нафтонасичена товщина, м; <math>K_{н.н.}</math> - нафтонасиченість, д.од.;  <math>\mu_n</math> – в'язкість пластової нафти, Па·с;  <math>\mu_B</math> - в'язкість води, Па · с;  <math>K_{пр}</math> - коефіцієнт проникності, Д;  <math>K_{п}</math> - коефіцієнт пористості, д.од.;  <math>P_o</math> - початковий пластовий тиск, Па;  <math>P_k</math> – пластовий тиск наприкінці розробки, а;  <math>C</math> – коефіцієнт відносної відповідності ефективності заводнення та природного водонапірного режиму, д. од.</p>

Емпіричні методи ґрунтуються на статистично-накопиченому узагальненому методі оцінки КВН. Вони дозволяють врахувати більше факторів, що впливають на прогнозний КВН, проте такі методи отримані дослідно-промисловим шляхом і видають мінімальні відмінності з фактичним КВН у окремих випадках, коли формула розрахунку КВН була скоригована під конкретні геолого-технічні умови нафтових покладів [2, 6].

Існує кілька залежностей для нафтових покладів, кожен з яких для коректного підрахунку КВН рекомендується використовувати за певних умов згідно з табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Емпіричні методи розрахунку коефіцієнта вилучення нафти

Формула	Умова застосування	Позначення параметрів
$\eta = 0,418 \cdot \left( \frac{K_{п} \cdot (1 - K_{н.св.})}{B_{н}} \right)^{0,1611} \cdot \left( \frac{K_{пр}}{\mu_{н0}} \right)^{0,0979} \cdot K_{н.св.}^{0,3722} \cdot \left( \frac{P_{н}}{P_{ср}} \right)^{0,1147}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Без ППТ</li> <li>- Режим розчиненого газу</li> </ul>	<p><math>K_{п}</math> - коефіцієнт пористості, д.од.;</p> <p><math>K_{пр}</math> - коефіцієнт проникності, Д;</p> <p><math>K_{н.св.}</math> - Насиченість пов'язаною водою, д.од.;</p> <p><math>B_{н}</math> - об'ємний коефіцієнт нафти при тиску насичення, д.од.;</p> <p><math>\mu_{н0}</math> - в'язкість нафти при тиску насичення, Па · с;</p> <p><math>P_{н}</math> - тиск насичення, Па;</p> <p><math>P_{ср}</math> - середньозважений пластовий тиск, Па.</p>
$\eta = 0,11403 + 0,2719 \cdot \lg K_{пр} \cdot 10000,25569 \cdot (1 - K_{н.н.})^{0,1355} \cdot \lg \mu_{н} [1,538 \cdot K_{п}^{0,00115} \cdot K_{п} \cdot h]$	- Теригенні поклади	<p><math>K_{п}</math> - коефіцієнт пористості, д.од.;</p> <p><math>K_{пр}</math> - коефіцієнт проникності, Д;</p> <p><math>K_{н.н.}</math> - нафтонасиченість, д.од.;</p> <p><math>\mu_{н}</math> - в'язкість пластової нафти, Па · с;</p> <p><math>h</math> - середня нафтонасичена товщина, м.</p>
$\eta = 0,764 \cdot e^{\frac{-0,0906 \cdot S}{\sqrt{G}}}$ <p>де <math>G = \frac{K_{пр} \cdot h}{\mu_{н}}</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Із застосуванням ППТ</li> <li>- <math>K_{р} &lt; 2</math></li> </ul>	$\mu_{н}$ - в'язкість пластової нафти, Па · с;

	- $K_{\text{пес}} > 0,75$	$S$ – щільність сітки свердловин, га/скв; $K_p$ - Коефіцієнт розчленованості, д.од.;
$\eta = 0,730 \cdot e^{\frac{-0,102 \cdot S}{\sqrt{G}}}$ де $G = \frac{K_{\text{пр}} \cdot h}{\mu_n}$	- Із застосуванням ППТ - $4 > K_p > 2$ - $0,6 < K_{\text{пес}} < 0,75$	$K_{\text{пр}}$ - коефіцієнт проникності, Д; $h$ – середня нафтонасичена товщина, м;
$\eta = 0,692 \cdot e^{\frac{-0,104 \cdot S}{\sqrt{G}}}$ де $G = \frac{K_{\text{пр}} \cdot h}{\mu_n}$	- Із застосуванням ППТ - $6 > K_p > 4$ - $0,5 < K_{\text{пес}} < 0,6$	$K_{\text{пес}}$ - коефіцієнт піщанистості, д.од.
$G = \frac{K_{\text{пр}} \cdot h}{\mu_n}$ де $G = \frac{K_{\text{пр}} \cdot h}{\mu_n}$	- Із застосуванням ППТ - $6 > K_p > 4$ - $0,5 < K_{\text{пес}} < 0,6$	

Деякі емпіричні методи застосовують із статистичною залежністю при водонапірному режимі для нафтових об'єктів, а також для родовищ категорії ТРВЗ. Також використовують у окремих випадках змішані способи, наприклад аналого-статистичні моделі розрахунки прогнозного КВН (метод похідних), засновані на багатовимірній регресії з метою первинної оцінки КВН, коли немає даних за технологічними показниками розробки, тобто використовуються у формулі тільки геологічні параметри (за наявності ППД) [7].

Умови вибору виражені залежністю КВН від переважної енергії, здатної транспортувати вуглеводні у пласті до вибою свердловини. Для покладів, що містять нафту, природною силою просування є:

- вода, що залягає нижче нафтових пластів - під тиском власної маси (водонапірний режим) або через пружне розширення з породою просуває нафту (пружно-водонапірний режим);

- газ, що знаходиться вище нафтових пластів у вигляді газової шапки – під тиском транспортує до свердловини нафту (режим газової шапки – газонапірний);

- нафтовий газ, що виштовхує нафту до вибою в результаті пружності при виділенні цього газу з нафти (режим розчиненого газу);
  - нафту – сила тяжкості самої нафти (гравітаційний режим) [3, 5.
- Розрахунково-експериментальний метод (покоефіцієнтний) використовує визначення величин ряду коефіцієнтів, що становлять формулу

$$КВН = K_{\text{вит}} \cdot K_{\text{ох}} \cdot K_{\text{зав}} \quad (2.1)$$

Де

КВН - коефіцієнт вилучення нафти, буд. од.;

$K_{\text{вит}}$  - коефіцієнт витіснення, д. од.;

$K_{\text{ох}}$  – коефіцієнт охоплення, буд. од.;

$K_{\text{зав}}$  - коефіцієнт заводнення, д. од [2, 8, 9].

На коефіцієнт витіснення впливають параметри, пов'язані з фізико-хімічними властивостями пластового флюїду, структурою зерен гірських порід, що утворюють пустотний простір, а також значення проникності:

$$K_{\text{вит}} = \frac{V_0 \cdot K_{\text{п}} \cdot (1 - K_{\text{н.св.}} - K_{\text{н.зал.}})}{V_0 \cdot K_{\text{п}} \cdot (1 - K_{\text{н.св.}})} = \frac{K_{\text{н.св.}} - K_{\text{н.ост.}}}{K_{\text{н.поч.}}} \quad (2.2)$$

Де

$V_0$  - Об'єм зразка породи, м<sup>3</sup>;

$K_{\text{н.св.}}$  - Насиченість пов'язаної водою, д.од.;

$K_{\text{н.зал.}}$  - Насиченість пов'язаної залишковою нафтою, д.од.;

$K_{\text{н.поч.}}$  - Початкова нафтонасиченість, д.од.;

$K_{\text{п}}$  - коефіцієнт пористості, д.од.

Що ж до коефіцієнта охоплення, то формулі враховуються частина поклади, обсягом якого фільтрується вуглеводнева рідина і загальний поровий обсяг пласта. Вони у свою чергу залежать від щільності сітки свердловин та уривчастості пласта [10, 11]:

$$K_{\text{охв}} = \frac{V_{\text{пп}}}{V_{\text{п}}} \quad (2.3)$$

де

$V_{\text{пп}}$  - обсяг поклади, охоплений процесом фільтрації, м<sup>3</sup>;

$V_{\text{п}}$  - початковий нафтовмісний обсяг поклади, м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт заводнення також має формулу відношення об'єму частини пласта, яка промита витісняючим агентом, до дренаючої частини нафтового пласта:

$$K_{\text{зав}} = \frac{V_{\text{пром.}}}{V_{\text{п.н.}}} \quad (2.4)$$

Де

$V_{\text{пром.}}$  - обсяг промитої частини поклади, зайнятий витісняючим агентом, м<sup>3</sup>;

$V_{\text{п.н.}}$  - обсяг зайнятого рухомий нафтою пласта, м<sup>3</sup>.

У цілому нині вищенаведені коефіцієнти враховують геолого-фізичну характеристику поклади нафти та особливостей запропонованої до

впровадження системи розробки [3, 7]. Варто також коротко виділити ще кілька методів прогнозування КВН:

- Екстраполяційні методи визначення КВН засновані на використанні залежності між видобутими обсягами нафти та рідини, отриманої при витісненні вуглеводнів із пласта гірських порід, побудованої за фактичними даними за тривалий період розробки родовища;

- Гідродинамічний метод застосовують шляхом створення гідродинамічних моделей, які включають динамічні характеристики пластових процесів і промислові дані по свердловинах;

- Факторний метод (інтегральний) використовує оцінку багатofакторної динаміки ФЄВ та енергії пласта для вилучення нафти;

Описані вище методи обчислення проектного КВН далеко не останні способи розрахунку, так як для кожного родовища потрібні коригування існуючих формул або створення нових методів кардинально для підвищення якості одержуваних результатів. Однак повністю виключити відхилення показань фактичного КВН з розрахунковим шляхом удосконалення методології оцінки КВН неможливо.

## **2.2 Механізм впливу зміни гідропровідності пласта на формування коефіцієнта вилучення нафти**

Відмінність між фактичним та розрахунковим КВН пов'язують із впливом гідропровідності та фільтраційно-ємнісних властивостей пласта. Похибка явно спостерігається розробки нових і унікальних родовищ, коли відомостей по основним геолого-технічним характеристикам покладів недостатньо чи є неточності. Через це проектний КВН виявляється завищеним чи заниженим, порівняно з фактичними показниками.

Гідро-провідність пласта – комплексний параметр, що включає кілька геолого-фізичних і технологічних чинників, які визначають продуктивність свердловини віддавати нафту урахуванням ФЄВ пласта. Зокрема, йдеться про середню нафтонасичену товщину пласта, в'язкість рідини та проникність ділянки, що розробляється:

$$\varepsilon = \frac{K_{\text{пр}} \cdot h}{\mu_{\text{ж}}} \quad (2.5)$$

де

$\varepsilon$  - гідропровідність пласта, Д·м/Па·с;

$K_{\text{пр}}$  - коефіцієнт проникності, Д;

$h$  – середня нафтонасичена товщина, м;

$\mu_{\text{ж}}$  - в'язкість рідини, Па · с.

Гідро-провідність пласта, як і наведені вище складові даної величини, входять у формулу Дюпюї, що є інтегральною формою закону Дарсі, завдяки якому можна розрахувати дебіт свердловини і згодом оцінити фактичний КВН [12, 13, 14, 15]:

$$Q_{\text{н}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot K_{\text{пр}} \cdot h \cdot \Delta P}{\mu_{\text{н}} \cdot \left( \ln \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{с}}} + C \right)} \quad (2.6)$$

Де

$Q_{\text{н}}$  - дебіт нафти, м<sup>3</sup>/добу;

$K_{\text{пр}}$  - коефіцієнт проникності, Д;

$h$  – середня нефтенасыщенная товщина пласта, м;

$\Delta P$  – різниця тисків (Депресія), Па;

$\mu_{\text{н}}$  - в'язкість нафти, Па · с;

$R_c$  - радіус свердловини, м;

$R_k$  – радіус контуру живлення, м;

$C$  – поправочний коефіцієнт за недосконалість свердловини, д.

Дана формула використовується у програмних продуктах для нафтових родовищ з наявністю контурних вод, що створюють натиск, або системи ППД при розрахунку основних технологічних показників розробки. Однак зв'язки з обмеженими можливостями роботи програм кінцеві результати обчислення проектних значень гідропровідності пласта, а відповідно і дебіту нафти впливають на похибку кінцевого розрахункового КВН.

Крім цього, гідропровідність пласта чутлива до ФЄВ. Як згадувалося раніше, ФЄВ бере участь у визначенні режиму роботи покладу, від якого залежить як спосіб розробки, а й метод розрахунку КИН. Також ФЄВ впливає побудова системи розміщення свердловин і вибір режиму роботи свердловин. В основному використовують для аналізу ФЄВ гістограми пористості та проникності аналізованого об'єкта розробки або карти геологічних розрізів з класами порід, що дає комплексне геологічне розуміння процесів утворення колекторів та можливих ускладнень (рис. 2.1) [5].

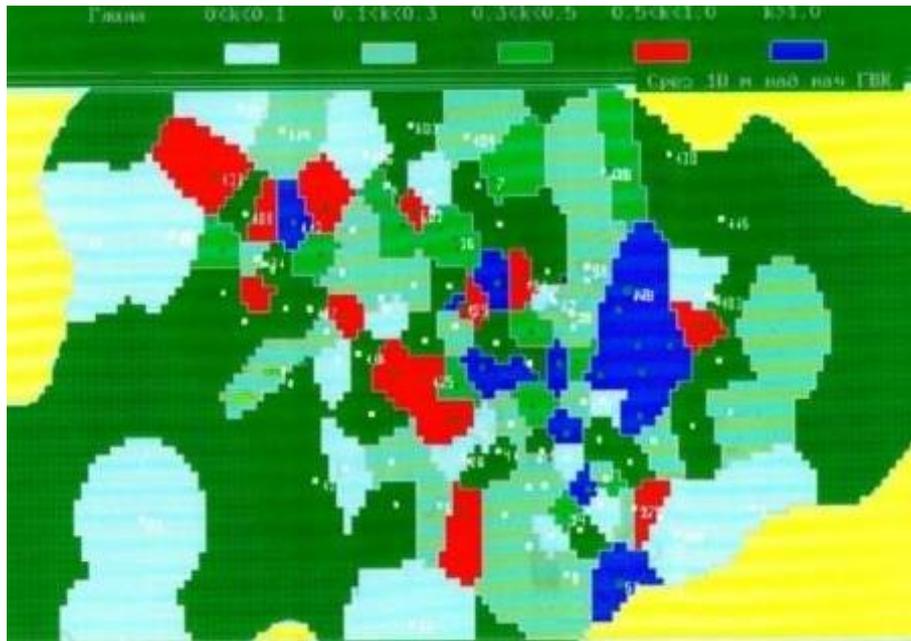


Рис. 2.1 – Карта геологічного розрізу за проникністю (клас порід) сеноманського пласта

За різних поєднань змін параметрів гідропровідності спостерігаються певні залежності від ФЄВ. Так, якщо змінювати в'язкість нафти і розподілити на групи за діапазонами значень – ФЄВ матиме взаємозв'язок не з усіма групами через розбіжність кореляцій за проникністю породи, яка входить у ФЄВ як одну з основних характеристик [13, 16].

Проблема відхилення розрахункових КВН від фактичних показань з погляду впливу гідропровідності пласта докладно розібрана в роботах Назарової Л.М., де автор зміг запропонувати свою методику прогнозування КВП з використанням особливостей гідропровідності при розрахунках за допомогою регресійного аналізу:

$$\eta = a + b \cdot \ln \varepsilon \quad (2.7)$$

Де

$\eta$  - коефіцієнт вилучення нафти, д.од.;

$\varepsilon$  – гідропровідність пласта, Д·м/Па·с;

а та  $b$  – коефіцієнти регресії, що описують взаємну зв'язок  $\eta$  та  $\varepsilon$ , д.од.

Така методика набула поширення для родовищ з водонапірною системою роботи пластів або ППТ, а також карбонатних покладів Східного регіону та Сирії [13, 16]. Однак методика вимагає вдосконалення, так як не до всіх типів родовищ можна застосувати з урахуванням вивченості та достовірності даних покладів, а також зменшення середньої похибки, звівши до діапазону 1-5%.

У зв'язку з цим властивості пласта та флюїду необхідно враховувати у формулі гідро-провідності для отримання більш наближених до фактичних цифр проектний КВН. Але в такому разі додавання змінних до складових гідро-провідності, а також і до формули Дюпюї та до розрахунку прогнозного КВН, призведе до зростання похибки. До того ж гідропровідність пласта є невід'ємним параметром при створенні математичних моделей покладів, у чисельних методах оцінки КВН, а також у блочно-факторному аналізі об'єкта розробки. Тому якість отриманих складових гідропровідності пласта впливають на динаміку різниці фактичного та розрахункового КВН, що можна спостерігати на рис. 2.2, де розглядаються декілька діапазонів значень гідропровідності пласта.

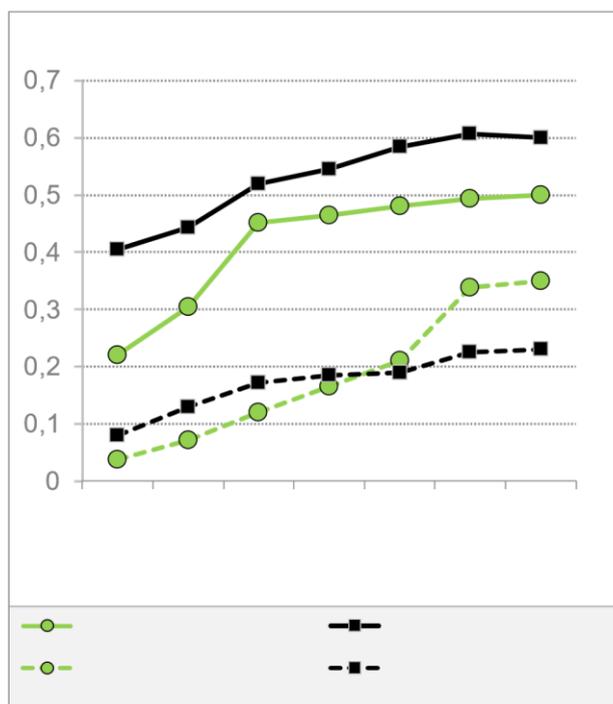


Рис. 2.2 – Оцінка різниці КВН з урахуванням гідро-провідності пласта

### 2.3 Застосування методу матеріального балансу до розрахунку коефіцієнта вилучення нафти

Залежно від цього, що входить у формулу прогнозного КВН і скільки включає змінних - похибка розрахунку зменшуватиметься завдяки точності врахованих чинників, мають найбільше впливом геть КВН, але водночас відмінність значень КВН зростає із збільшенням змінних у формулі. Тобто йдеться про метод матеріального балансу для підрахунку запасів нафти, який чутливий до якості даних та має різні варіації та обмеження.

Рівняння матеріального балансу (РМБ) флюїдів у пласті — безрозмірна математична модель обліку динаміки припливу води із законтурної області, запасів вуглеводнів та встановлений режим розробки ділянки, що розглядається. Тобто цей інструмент дозволяє узгоджувати зміну пластового тиску з дебітом рідини, що спрощує моніторинг та контроль

основних геолого-технічних показань, у тому числі й поточний КВН завдяки мінімізації використовуваних вихідних даних для розрахунків [17, 18, 19, 20].

Спочатку РМБ часто практикували використовувати для підрахунку запасів нафти і газу на етапі розвідки, щоб оперативно на основі первинних вихідних геолого-фізичних параметрів, що включають пластовий тиск, стисливість гірських порід і рідини, що знаходяться в них, а також заміряні або обчислені обсяги вуглеводнів. Пласт ж, згідно з класичною теорією РМБ, представляється як однорідний ізотропний та ізольований поровий обсяг, що характеризується середнім пластовим тиском у будь-який проміжок часу [17, 18].

Але недоліком цієї теорії є обмеженість використання РМБ лише у разі симетричного розподілу постійного тиску, коли враховуються коефіцієнти участі свердловин та зміни мають бути в ізометричних умовах. До того ж такий підхід не бере до уваги ФЄВ (пористість, проникність, водонасиченість), тиск насичення тощо [21, 22].

Згодом розвитку чисельного, геологічного та гідродинамічного моделювання потреба у використанні методу матеріального балансу падає. Хоча програмні продукти також мають свої слабкі сторони, які РМБ може закрити комплексним шляхом, а саме впровадження РМБ у процедуру чисельного моделювання поточного стану розробки покладів вуглеводнів.

З допомогою РМБ можна визначити через побудову, перерозподілу та доповнення у лівій та правій частині рівняння набору складових КВН та інших основних показників розробки, а також визначити переважний механізм витіснення нафти із пласта в свердловину. А чисельне моделювання у свою чергу дозволяє спростити побудову математичної моделі за допомогою обчислювальних потужностей програм та зіставити історичні дані видобутку з метою прогнозування подальшої динаміки дебіту

та інших параметрів та адаптації існуючої гідродинамічної моделі об'єкта розробки [23, 24].

Загальний вигляд рівняння матеріального балансу має наступний вигляд [25]:

$$N_p \cdot [B_o + (R_p - R_s) \cdot B_g] + W_p \cdot B_w = N \cdot [(B_o - B_{oi}) + (R_{si} - R_s) \cdot B_g] + m \cdot N \cdot B_{oi} \left( \frac{B_g}{B_{gi}} - 1 \right) + \frac{(1 - m) \cdot N \cdot B_{oi} (c_w s_w + c_f) \cdot \Delta P}{1 - s_{wc}} + W_e \cdot B_w$$

де

$N_p$  - накопичений видобуток нафти, м<sup>3</sup>;

$N$  - запаси нафти, м<sup>3</sup>;

$B_o$  - об'ємний коефіцієнт нафти, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$B_{oi}$  - початковий об'ємний коефіцієнт нафти, од.;

$R_p$  - накопичений газовий фактор, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$R_s$  - газовий фактор при розчиненому газі, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$R_{si}$  - початковий газовий фактор при розчиненому газі, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$\Delta P$  - зміна тиску, Па;

$c_f$  - стисливість породи, 1/Па;

$c_w$  - стисливість води, 1/Па;

$s_w$  - насиченість водою, од.;

$s_{wc}$  - насиченість в області фронту обводнення, од.;

$W_e$  - приплив води з-за контуру, м<sup>3</sup>;

$W_p$  - накопичений видобуток води, м<sup>3</sup>;

$B_w$  - об'ємний коефіцієнт води, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$B_g$  - об'ємний коефіцієнт газу, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$B_{gi}$  - початковий об'ємний коефіцієнт газу, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$m$  - відношення початкового порового об'єму газової шапки до об'єму нафтової зони в УМБ, од.

Рівняння матеріального балансу має безліч видів залежно від геологічних умов пластів-колекторів, фізико-хімічних властивостей вуглеводнів та інших особливостей нафтового родовища. Нижче наведено деякі варіанти РМБ, які були запропоновані авторами робіт (Рубльов А.Б., Панасенко Н. Л., Кесслер Ю.А. та ін.) для конкретних випадків:

– Водонапірний режим (наявність гідродинамічного зв'язку та високі показники ФЄВ):

$$N = \frac{N_p B_o - (W_e - W_p)}{B_o - B_{oi} + (c_f + c_w s_w) \cdot \Delta P \cdot \frac{B_{oi}}{1 - s_{wr}}} \quad (2.9)$$

Де

$N$  - запаси нафти, м<sup>3</sup>;

$N_p$  - накопичений видобуток нафти, м<sup>3</sup>;

$B_o$  - початковий об'ємний коефіцієнт нафти, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$B_{oi}$  - поточний об'ємний коефіцієнт нафти, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$\Delta P$  - зміна середнього пластового тиску, Па;

$c_f$  - стисливість породи, 1/Па;

$c_w$  - стисливість води, 1/Па.

$W_e$  - накопичений приплив із законтурної області, м<sup>3</sup>;

$s_{wr}$  - залишкова водонасиченість, од.;

$W_p$  - накопичений видобуток води, м<sup>3</sup>.

– Пружний режим (розширення нафти):

$$N_p B_o = V_{oi} \Delta P \cdot \left( \frac{c_f}{s_{oi}} + \frac{c_o s_o}{s_{oi}} + \frac{c_w s_w}{s_{oi}} \right) \quad (2.10)$$

де

$N_p$  - накопичений видобуток нафти, м<sup>3</sup>;

$B_o$  - об'ємний коефіцієнт нафти, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$V_{oi}$  - початковий об'єм нафти, м<sup>3</sup>;

$\Delta P$  - зміна тиску, Па;

$c_f$  - стисливість породи, 1/Па;

$c_o$  - стисливість нафти, 1/Па;

$c_w$  - стисливість води, 1/Па;

$s_w$  - насиченість водою, од.;

$s_{oi}$  - насиченість нафти, од.

- Пружно-водонапірний режим (наявність напору води та розширення нафти):

$$N_p \cdot B_o = N \cdot B_{oi} \cdot \Delta P \cdot C_e + W_e - W_p \cdot B_w \quad (2.11)$$

де

$N_p$  - накопичений видобуток нафти, м<sup>3</sup>;

$B_o$  - об'ємний коефіцієнт нафти, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$N$  - запаси нафти, м<sup>3</sup>;

$B_{oi}$  - початковий об'ємний коефіцієнт нафти, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$\Delta P$  - зміна тиску, Па;

$C_e$  - ефективна стисливість породи, 1/Па.

Узагальнення та аналіз актуальних факторів, що впливають на проектний КВП, дають уявлення про способи регулювання розрахункового КВП та наближення його до реальних фактичних умов. Проте від прогнозного КВН залежить ефективність розробки нафтових родовищ, а й

від технологічного процесу видобутку нафти, тобто фактичного КВН, яким можна керувати з допомогою геолого-технічних заходів.

## **2.4 Обґрунтування застосування моделей на підставі технологічних показників гідравлічного розриву пласта на нафтових місцях**

### **2.4.1 Сутність технології гідравлічного розриву пласта**

Для наближення фактичного КВН до проектних значень застосовують методи збільшення нафтовіддачі (МЗН) та інтенсифікації припливу рідини із пласта. У разі найпоширенішим є технологія гідравлічного розриву пласта (ГРП) – метод на продуктивну поклад, у якому створюється тиск на пласт, приблизно 1,5-2 разу більше пластового тиску, шляхом закачування спеціальної рідини розриву (РР) в свердловину. Це призводить до розриву породи по площинах мінімальної міцності та появі нових штучних тріщин, які створюють взаємозв'язок із зонами високої проникності. В результаті відбувається розширення дренажу свердловини та збільшення продуктивності покладу. Для закріплення тріщин у розкритому стані використовуються зернисті матеріали або агенти, що розклинюють. А матеріали, що застосовуються як ЖР, виступають різні (піски, синтетичні матеріали та ін) [26, 27, 28].

Відповідно до теоретичної інформації підземної гідромеханіки, визначити потік рідини дозволяє закон Дарсі:

$$Q = \frac{K_{\text{пр}} \cdot A \cdot \Delta P}{\mu_{\text{ж}} \cdot L} \quad (2.12)$$

де

$Q$  - дебіт рідини, м<sup>3</sup>/добу;

$K_{пр}$  - коефіцієнт проникності, D;

$A$  - площа поперечного перерізу, м<sup>2</sup>;

$\mu_{ж}$  - динамічна в'язкість рідини, Па·с;

$\Delta P$  - зміна тиску, Па;

$L$  - довжина середовища, м.

Радіальний приплив рідини утворюється в результаті сильного тиску, завдяки якому відбувається транспортування вуглеводень до свердловини через обмеження у вигляді гірських порід. Для подальшого підвищення кількості надходження пластової рідини можна застосувати ГРП, створюючи високо-проникну тріщину шляхом підвищення радіусу живлення і відповідно збільшення площі припливу, що торкаються низько-проникних пластів. Такий потік рідини від пласта до свердловини стає лінійним або білінійним (рис. 2.3) [24, 27, 28, 29].

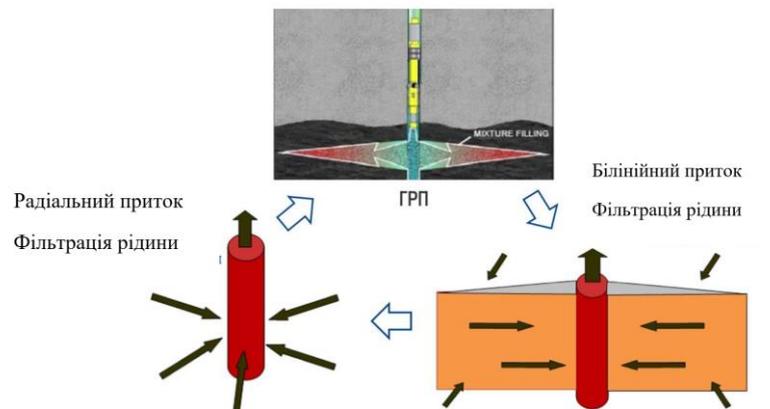


Рис. 2.3 – Схема переходу припливу рідини при гідравлічному розриві пласта

За підсумками дебіт свердловини стає більшим через падіння гідравлічних опорів у привибійній зоні пласта (ПЗП), підвищення ФЄВ і підключення раніше незайманих пропластків з низькою проникністю. Згодом

рідина з білінейного перетворюється на проміжний етап (псевдо-лінійний потік, пізніше псевдо-радіальний) і відновлюється в радіальний режим.

Щоб створити тріщину під час проведення ГРП, треба перевищити межу міцності поклади на розрив. При цьому природна напруга порід (геостатична, максимальна і мінімальна) задає швидкість росту та напрямки тріщини, перпендикулярної осі найменшої напруги.

$$\left[ R = \frac{(P_f - S_1) + (P_f - S_2)}{(S_1 - S_2)} \right] \quad (2.13)$$

де  $P_f$  - тиск рідини ГРП, Па;

$S_1$  - максимальна загальна горизонтальна напруга, Па;

$S_2$  - мінімальна загальна горизонтальна напруга, Па.

При співвідношеннях напруги тріщина може бути спрямована як горизонтально, так і вертикально і під нахилом. Залежить все від того, яка напруга є найбільшою, а з двох варіантів, що залишилися, - найменшої.

Якщо дані щодо тиску закачування рідини ГРП у пласт беруть із показань забійного манометра та інтерпретацій записів забійних датчиків, то значення горизонтальних напруг розраховують наступним чином:

$$S_{min} = \left( \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot [P_{об} - \alpha_\nu P_{пл} + \alpha_h P_p] + (\epsilon_x E + S_t) \right) = S_{літ} + S_{тек} \quad (2.14)$$

де

$S_{min}$  - мінімальне горизонтальне напруження, Па;

$\nu$  - коефіцієнт Пуассона, од.;

$P_{об}$  - тиск вищезалягаючих товщ, Па;

$\alpha_\nu$  - вертикальна стала порової пружності Біота, од.;

$\alpha_h$  - горизонтальна стала порової пружності Біота, од.;

$P_{пл}$  – пластовий тиск, Па;

$\varepsilon_x$  – регіональне горизонтальне мікронапруження, Па;

$E$  – модуль Юнга, Па;

$S_t$  – регіональне горизонтальне тектонічне напруження, Па;

$S_{літ}$  – літостатичне напруження, Па;

$S_{тек}$  – тектонічне напруження, Па.

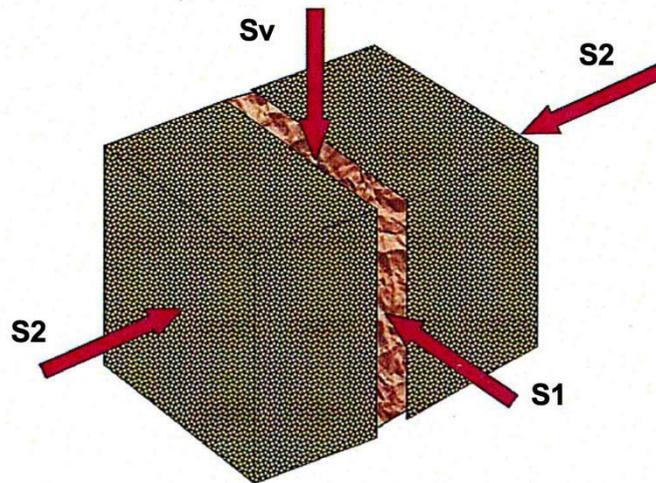


Рис. 2.4 – Схема дії напруги на пласт де  $S_v$  – вертикальна (геостатична) напруга, Па.

Також дані з напруг отримують на основі тестів, що проводяться при закачках і аналізу геологічної інформації, тобто отримані каротажі в ході проведення геофізичних досліджень свердловин (ГДС).

Тектонічну напругу включають у формулу (2.14) у тому випадку, коли є порушення в пласті, викликаними тектонічними порушеннями (скидання, вкидання, зрушення та ін.) розглянутої ділянки [32].

У практиці застосування ГРП існують досить велика база технологій, кожна з яких має переваги у тому чи іншому конкретному місці проведення операції з інтенсифікації припливу нафти. Відомі методи ГРП:

- одноразові з використанням ньютонівських рідин;
- багаторазовий;

- масований з великим обсягом техніки, ресурсів, а також застосування неньютонівських рідин;
- поінтервальний (спрямований), що регулює в продуктивному розрізі свердловини утворення тріщин;
- двофракційний як технологію розконсервації свердловин;
- розрив за допомогою вибухових речовин (включаючи газ та нафту) [33,34, 35].

Крім цієї класифікації ще виділяють кислотний ГРП (для карбонатних покладів), пінний ГРП, суть якого полягає у застосуванні в якості ЗР азот або вуглекислий газ для більш щадної реалізації створення тріщин, гібридний ГРП, що включає кілька РР з локальними властивостями, необхідних для ефективного проведення ГРП з урахуванням поточних вихідних. Підключити низько-проникні ділянки та збільшити їхню роботу з віддачі вуглеводнів можна завдяки селективному ГРП. Також варто згадати імпульсний та повторний ГРП.

Мультистадійний (багатоступінчастий) ГРП отримав свою популярність через високу ефективність застосування в комплексі з бурінням горизонтальних свердловин як спосіб реалізації родовищ класифікації ТРВЗ (низькі ФЄВ, підшовні води). Високо-провідні тріщини також є викликом для сервісної компанії, яка проводить ГРП.

Технологія TSO (tip-screenout) дає цьому типу ГРП зробити як високі значення проникності пласта через розширення тріщини, а й опустити значення опору ПЗП до мінімуму. А протяжні тріщини взагалі залучають нові ділянки з нафтою і знижують поточну обводненість свердловин [36, 37].

Метод ГРП складається із трьох основних послідовних етапів: проектування, підготовка до проведення та безпосередня реалізація ГРП. Перший етап є важливим, тому що там проводять моделювання геометрії тріщин ГРП з метою розрахунку необхідних технологічних ресурсів

успішної реалізації ГРП та отримання цільових значень додаткового видобутку вуглеводнів.

Для впливу на кінцевий фактичний КВН потрібно створити математичну модель, яка спрогнозує найкращий варіант утворення тріщини ГРП, щоб підняти КВН до проектних показників.

## 2.5 Застосування різних методів моделювання гідравлічного розриву пласта у процесі виконання геолого-технічного заходу

Моделювання ГРП – невід'ємний інструмент оптимізації проведення технологічного процесу. У ньому розглядається симуляція зростання тріщини при ГРП з урахуванням вихідних геолого-фізичних даних та обмежень, встановлених з природних чи штучних причин, а також залежність розкриття тріщини від факторів впливу на нього рідин із твердими частинками [38, 39, 40].

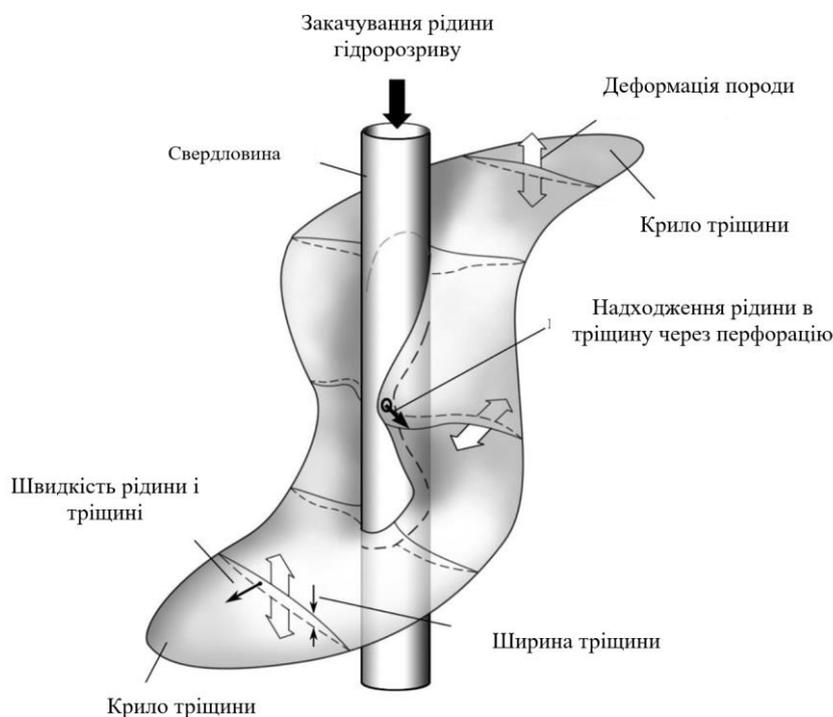


Рис.2.5 – Схема процесу ГРП

У загальному випадку математичну модель становить РМБ для ГРП (2.15), формули довжини (2.16) та ширини тріщини (2.17):

$$V_{\text{зак}} = V_{\text{ж}} + V_{\text{погл}} \quad (2.15)$$

$$l = \sqrt{\frac{V_{\text{ж}} \cdot E}{5,6 \cdot (1-\nu)^2 \cdot h \cdot (P_{\text{забр}} - P_{\text{ГГ}})}} \quad (2.16)$$

$$\omega = \frac{4 \cdot (1-\nu)^2 \cdot (P_{\text{забр}} - P_{\text{ГГ}}) \cdot l}{E} \quad (2.17)$$

де  $V_{\text{зак}}$  - обсяг закачування, м<sup>3</sup>;

$V_{\text{ж}}$  - обсяг рідини для тріщини при ГРП, м<sup>3</sup>;

$V_{\text{погл}}$  - обсяг поглинається продавочної рідини, м<sup>3</sup>;

$E$  - модуль Юнга, Па;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона гірських порід, д.од.;

$h$  – величина інтервалу перфорації, м;

$P_{\text{ГГ}}$  - горизонтальна складова гірського тиску, Па;

$P_{\text{забр}}$  - вибійний тиск розриву, Па;

$l$  - Довжина тріщини, м;

$\omega$  - ширина (розкритість) тріщини, м [41].

Однак більшість параметрів включають ряд перетворень, які потрібно так чи інакше включати в модель. В іншому випадку, тріщина ГРП матиме низьку точність і мало співпадати з реальністю, але перераховані вище формули – це основа для розрахунків, яка використовується у всіх чисельних моделях.

Математичні моделі класифікуються залежно від розміру рівняння, тобто кількість змінних, що використовуються у формулі, їх складові, а також визначення тих геометричних параметрів тріщини (довжина, ширина, висота), які динамічно зміняться.

Одномірні моделі - це плоско-симетричне уявлення тріщини ГРП, коли зростання описується прямолінійно, а довжина тріщини буде показуватися в моделі як параметр, що динамічно змінюється (рис.2.6).

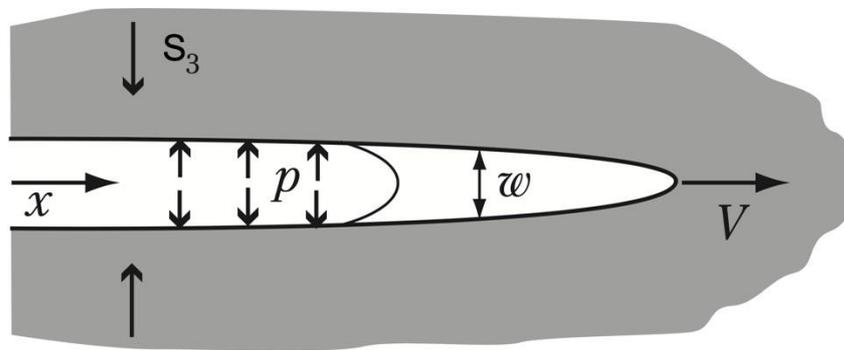


Рис. 2.6 – Приклад одновимірної моделі тріщини

Деякі автори (Есипов, Куранаков тощо.) виділяють дві групи одновимірних моделей, де у першу зараховують моделі Христиановича Гіртсма-де Клерка (KGD) і Перкінса-Керна-Нордгрена (РКН), тоді як у другу – радіальну модель [40]. Однак в інженерній практиці завжди була і залишається прийнята концепція, що дані моделі відносяться до двовимірних моделей, які будуть описані нижче [40, 42].

Загалом у одновимірні математичні моделі входять критерії розвитку тріщини, рівняння пружності, нерозривності та потоку флюїду, які описують тріщину:

$$\frac{\partial(\rho \omega u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \omega u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + 2 \cdot \rho \cdot u_L = 0 \quad (2.18)$$

де

$\rho$ — густина рідини, г/см<sup>3</sup>;

$\omega$ — ширина (розкриття) тріщини, м;

$u_x$ — компонента потоку за координатою  $x$ , од.;

$u_y$ — компонента потоку за координатою  $y$ , од.;

$u_L$ — швидкість витoku, Па · м<sup>3</sup>/с.

Формула (2.18) є рівнянням збереження маси рідини в тріщині, що має векторну форму:

Формула (2.19) — рівняння збереження маси рідини у тріщині

$$\vec{V} \cdot (\rho \cdot \omega \cdot \vec{u}) + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + 2 \cdot \rho \cdot u_L = 0 \quad (2.19)$$

де

$\vec{u}$  вектор потоку рідини, од. ;

$\vec{V}$  — оператор Гамільтона:

$$\vec{V} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.20)$$

Де

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  — орти координатних осей;

$x, y, z$  — координати уздовж довжини, ширини і висоти тріщини, од.

Враховуючи модуль плоскої деформації (2.21), можна спостерігати взаємозв'язок ширини тріщини з градієнтом тиску (2.22) та тиском рідини (2.23):

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (2.21)$$

$$q = -\frac{n'}{2n' + 1} \left( \frac{1}{2n' + 1} K' \right)^{1/n'} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{1/n'} \cdot \omega^{(2n' + 1)/n'} \quad (2.22)$$

$$\omega(x) = \frac{4}{\pi E'} \int_0^l [p(y) - S_3] \cdot \ln \left| \frac{\sqrt{(l^2 - x^2)} + \sqrt{(l^2 - y^2)}}{\sqrt{(l^2 - x^2)} - \sqrt{(l^2 - y^2)}} \right| dy \quad (2.23)$$

де

$E'$  — модуль плоскої деформації, Па;

$E$  — модуль Юнга, Па;

$\nu$  — коефіцієнт Пуассона гірських порід, од.;

$q$  — витрата рідини, м<sup>3</sup>/хв;

$\omega$  — ширина (розкриття) тріщини, м;

$l$  — довжина тріщини, м;

$p$  — тиск рідини в тріщині, Па;

$n'$  — показник режиму течії, од.;

$K'$  — показник консистенції, Па · с <sup>$n$</sup>

$S_3$  — напруження, перпендикулярне площині тріщини, Па[42].

Одновимірні моделі вже щодо мало використовують в нафтогазовій галузі в плані моделювання ГРП, але наступні види моделей беруть початок саме з базових та одновимірних типів.

Модель, у якої зміни геометрії тріщин спостерігається у двох із трьох проекціях (довжина та ширина), тим самим дозволяючи розглядати викривлення траєкторії зростання тріщини є двовимірними (2D). Вони включають присутність порожнини свердловин і криволінійність горизонтального перерізу тріщини через що тріщина рухається поперек дії мінімальних напруг. У цьому крила тріщини щодо осі свердловини симетричні [40].

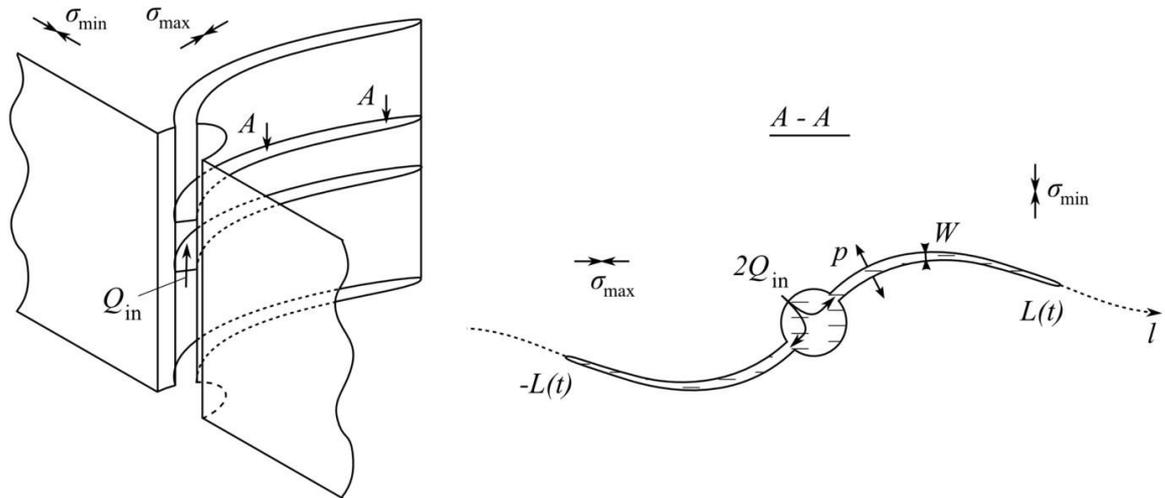


Рис.2.7 – Приклад двовимірної моделі тріщини

Основні формули довжини (2.24) і ширини (2.25) тріщини ГРП мають невеликі відмінності від одновимірних через додавання ФЄВ свердловини кандидата на проведення ГРП:

$$l = \sqrt{\frac{V_{\text{ж}} \cdot q_i \cdot \mu}{2 \cdot \pi^2 \cdot h^2 \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{пр}} \cdot s_{\infty}}} \quad (2.24)$$

$$\omega = \frac{4 \cdot (1-2\nu) \cdot (1+\nu) \cdot (P_{\text{забр}} - P_{\text{гр}}) \cdot l}{3 \cdot E} \quad (2.25)$$

де

$V_{ж}$  - обсяг рідини для тріщини при ГРП, м<sup>3</sup>;

$E$  - модуль Юнга, Па;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона гірських порід, д.од.;

$h$  – величина інтервалу перфорації, м;

$P_{гг}$  - горизонтальна складова гірського тиску, Па;

$P_{забр}$  - вибійний тиск розриву, Па;

$l$  - Довжина тріщини, м;

$\omega$  – ширина (розкритість) тріщини, м.

Однак у компаніях при проектуванні ГРП використовують такі покращені двовимірні моделі:

– KGD-модель, що допускає не брати до уваги верхні та нижні межі, тобто фіксована висота тріщини та перевищення цієї висоти щодо її загальної довжини. Завдяки такому підходу деформація і руйнування гірської породи, що розглядається, описується квазістатичне наближення та інтегральне співвідношенням між розкриттям в ній тріщин і тиск рідини. Рідина фільтрується горизонтально, розкриття тріщини відбувається у горизонтальній площині, а ширина у своїй не змінюється з висотою. Поперечний переріз у даній моделі утворюється у прямокутній формі [40, 43, 44];

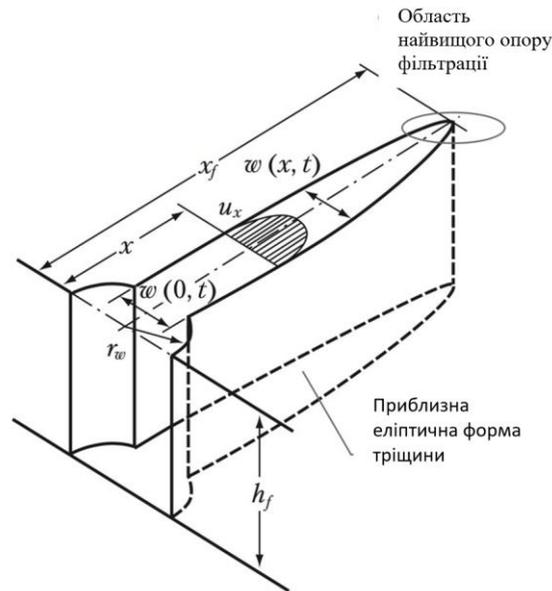


Рис. 2.8 – Геометрія KGD-моделі тріщини ГРП

$$\omega = \frac{4 \cdot (1 - \nu^2)}{E} \cdot l \cdot (P_{\text{забр}} - P_{\text{гг}}) \quad (2.26)$$

$$A = h \cdot \omega \quad (2.27)$$

Де

$E$  - модуль Юнга, Па;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона гірських порід, д.од.;

$P_{\text{гг}}$  - горизонтальна складова гірського тиску, Па;

$P_{\text{забр}}$  - вибійний тиск розриву, Па;

$l$  - Довжина тріщини, м;

$\omega$  – ширина (розкритість) тріщини, м;

$h$  – товщина шару, м;

$A$  - площа поперечного перерізу, м<sup>2</sup>.

– PKN-модель пропонує за константу взяти висоту тріщини, яка, на відміну від KGD-моделі, навпаки, набагато менша від загальної довжини тріщини. Внаслідок цього, деформація породи при малій динаміці основних показників тріщини по ходу її довжини стає еквівалентним плоскому

деформованому стану. Фільтрація рідини також, як і в KGD горизонтальна, тріщина розкривається вертикально і має еліптичний поперечний переріз і таку ж форму з максимальною шириною до центру [45, 46, 47];

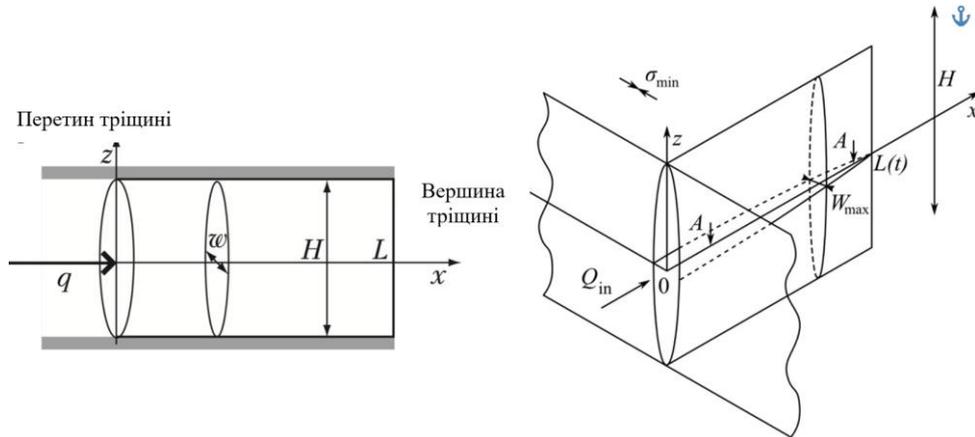


Рис. 2.9 – Геометрія розвитку РНК-моделі тріщини гідравлічного розриву пласта

$$\omega = \frac{1 - \nu}{G} \cdot h \cdot (P_{\text{забр}} - P_{\text{гр}}) \quad (2.28)$$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot h \cdot \omega \quad (2.29)$$

Де

$G$  - модуль поперечної деформації, Па;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона гірських порід, д.од.;

$P_{\text{гр}}$  - горизонтальна складова гірського тиску, Па;

$P_{\text{забр}}$  - вибійний тиск розриву, Па;

$h$  – товщина шару, м;

$\omega$  – ширина (розкритість) тріщини, м;

$A$  - площа поперечного перерізу, м<sup>2</sup>.

- Радіальна модель тріщини показує поширюється від точкового джерела радіально, зберігаючи симетрію. Тут загальна довжина тріщини приблизно дорівнює половині висоти своєї тріщини, маючи схожі риси з KGD-моделлю. Такі моделі можна використовувати для пластів, що залягають на невеликих глибинах або пластів з АВПД [4].

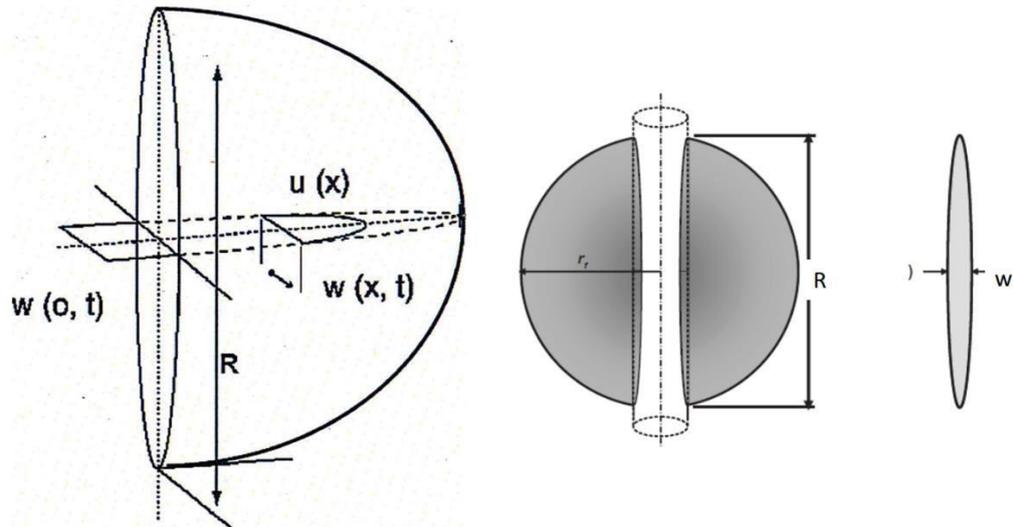


Рис. 2.10 – Приклад моделі радіальної тріщини

Також існують гібридні PKN-KGD-моделі з різними доповненнями: облік фільтраційних витоків рідини, наявність пропанту та умови транспортування їх у тріщині, рівняння п'єзо-провідності. Двовимірні моделі продовжують розширювати та вдосконалити, додаючи важливі функції, як алгоритми верифікації даних, чисельні методи розрахунків та ін [45, 48, 49].

І все ж 2D моделі мають ряд недоліків: нереалістичне уявлення про висоту тріщини, одномірний розподіл пропанту, обмеження можливостей моделей (PKN-моделі можна тільки при довжині тріщини, набагато більшої висоти і навпаки з KGD-моделлю) [48, 49].

Моделі псевдо-3D (P3D) або «кваситривимірні» засновані на прагненні зменшити обчислювальні витрати з одного боку та з іншого - використовувати найбільш важливі риси тривимірних моделей. Тріщина має плоский вигляд і орієнтований перпендикулярно до мінімальних напруг залягання. Це дає

можливість розрахувати відразу горизонтальне і вертикальне зростання тріщини, а точніше фронт тріщини.

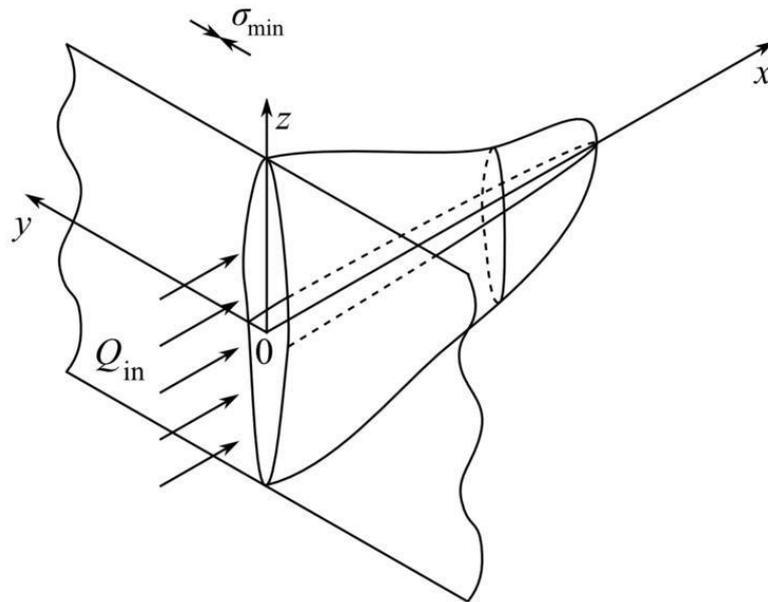


Рис. 2.11 – Приклад геометрії P3D-моделі тріщин

Квазітривимірні моделі в свою чергу діляться на Lumped (LP) або "Зосереджена" і Cell-based (CB) або "блочна". Зосереджена псевдо-3D має дві напівеліптичні тріщини зі спрощеним аналізом її розвитку. Також варто відзначити усереднений спосіб описування фізичних процесів та розрахунку геометрії тріщин та тиску (рис. 2.12) [48, 50].

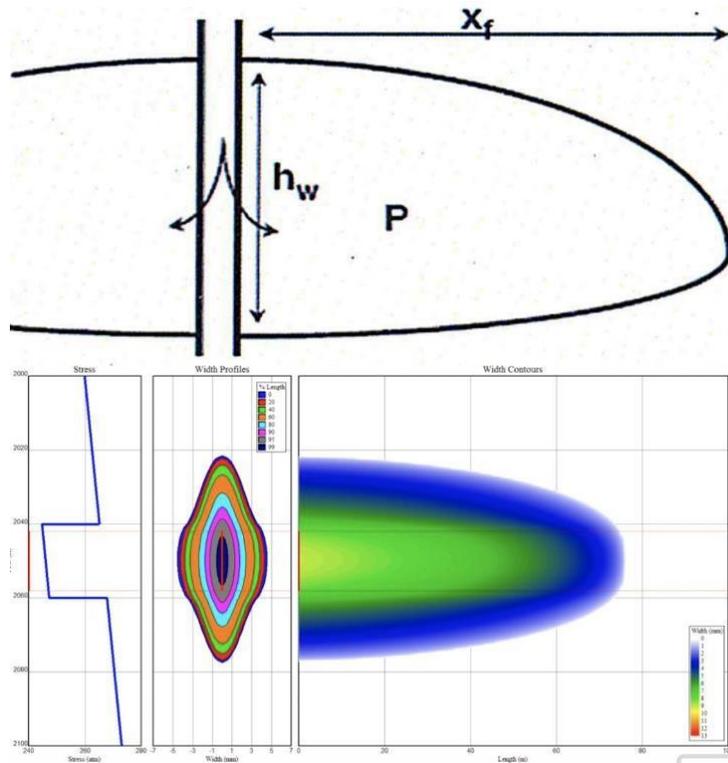


Рис. 2.12 – Приклад псевдо-3D LP тріщини

Що стосується блокової P3D-моделі тріщини - це продовження розвитку моделі PKN з тією різницею, що тріщина представляється розділеною за своєю довжиною на окремі блоки, кожен з яких може мати свою висоту та розкриття. У межах цієї моделі поперечний переріз тріщини може змінювати висоту. Використовуючи поздовжню дискретизацію, схема PKN може бути представлена як і блокова псевдо-3D, але з фіксованою висотою блоку (рис. 2.13).

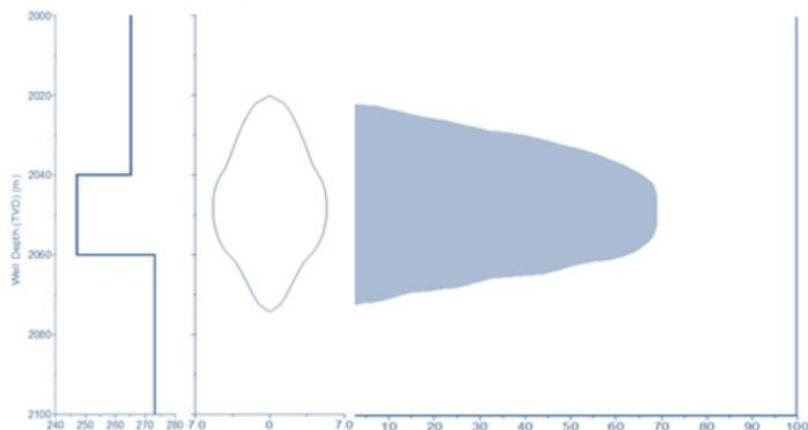


Рис. 2.13 – Геометрія псевдо-3D СВ тріщини

Важливо відзначити основні положення, прийняті для вищевказаної моделі:

- Плоска тріщина являє собою сукупність поперечних блоків, кожен з яких має свою висоту та розкриття;
- Пласт містить кілька горизонтальних шарів, в яких можуть діяти різні нормальні до площини тріщини напруги, шари можуть характеризуватись різною тріщинуватістю. Пружні властивості, проте, приймаються однорідними та ізотропними;
- Форма розкриття може відхилятися від еліпсоїдальної відповідно до рішення задачі пружності для шаруватого середовища;
- Незважаючи на те, що висота блоків може змінюватися в процесі симуляції, вважається, що вона змінюється відносно повільно, тріщина поширюється переважно поздовжньо. І тут можна розглядати односпрямований рух рідини, вважаючи, що швидкість вертикальних витоків мала;
- Тріщина зростає у висоту квазістатично [50].

Planar 3D. Цей метод математичного моделювання тріщин є просунутим і активно використовуваним у вітчизняних сервісних компаніях з проведення ГРП. Planar 3D (PL3D) передбачає, що матеріал породи є лінійно-пружним, тріщина ГРП розвивається у вертикальній площині і потік рідини в тріщині підпорядковується рівнянню течії Пуазеля (нестислива рідина) [51, 52].

В основу PL3D входять рівняння теорії пружності, які пов'язують деформацію порід пласта з накладеними на них зовнішніми напругами і тиском, що надається пропантом і РР, рівняння гідродинаміки в наближенні мастильного шару, фільтрації РР з тріщини в пласт, опис перенесення пропанту РР і далі тріщини, і навіть описи умов зростання тріщини ГРП з

урахуванням теорій лінійно-пружної механіки руйнації [52]. Такі моделі дають точніше результати, ніж псевдо-3D, і, незважаючи на високі вимоги до обчислювальних потужностей, розрахунки виробляють швидше ніж повноцінні тривимірні моделі тріщин [51].

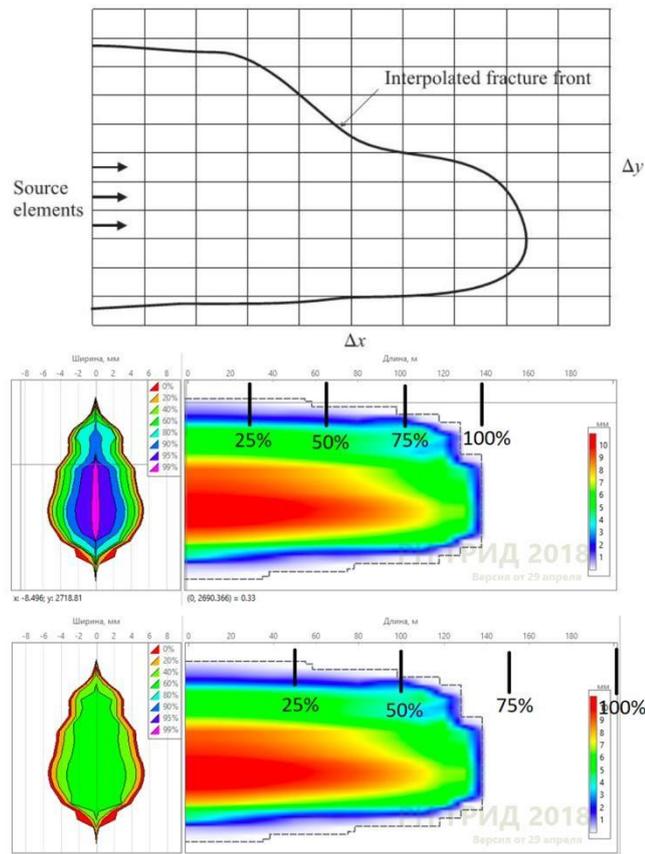


Рис. 2.14 – Схема із прикладом реалізації моделі Planar 3D

Тривимірні моделі. У Full 3D моделях напрямки тріщин не обмежений і більш наближений до реальних умов. Особливість полягає в комплексному описі всіх тривимірних явищ, які не могли бути повною мірою враховані в попередніх математичних моделях: перебіг рідини всередині тріщини, напружено-деформовані поля стану породи та параметри-орієнтири сторін поширення фронту тріщини [40,51].

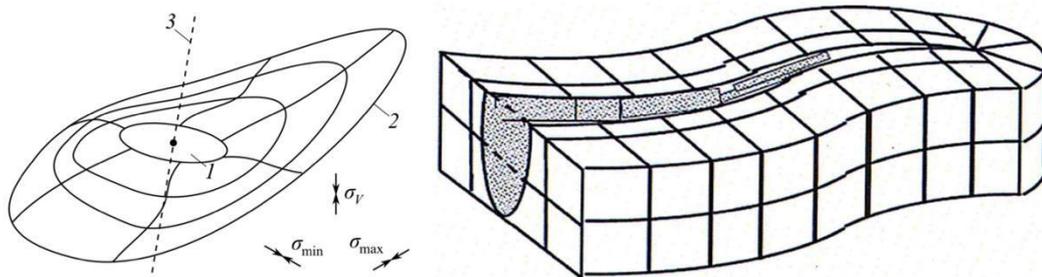


Рис. 2.15 – Геометрично представлена тривимірна модель тріщини: 1 - ініціація зародка тріщини; 2 – фронт напрямку тріщини; 3 – свердловина, що розглядається при математичному Full 3D моделюванні.

Однак, як викладалося раніше, тривимірні моделі вимагають багато часу, великого обсягу вихідних даних та обчислювальних потужностей, щоб видати комплексну 3D картину реалізації тріщини ГРП. Модель Full 3D удосконалюється і реалізується переважно у науково-технічних нафтогазових центрах та проектно-дослідних інститутах з метою проведення комплексної роботи з оцінки ефективності проектування геометрії тріщин ГРП та подальшої оптимізації. [53, 54].

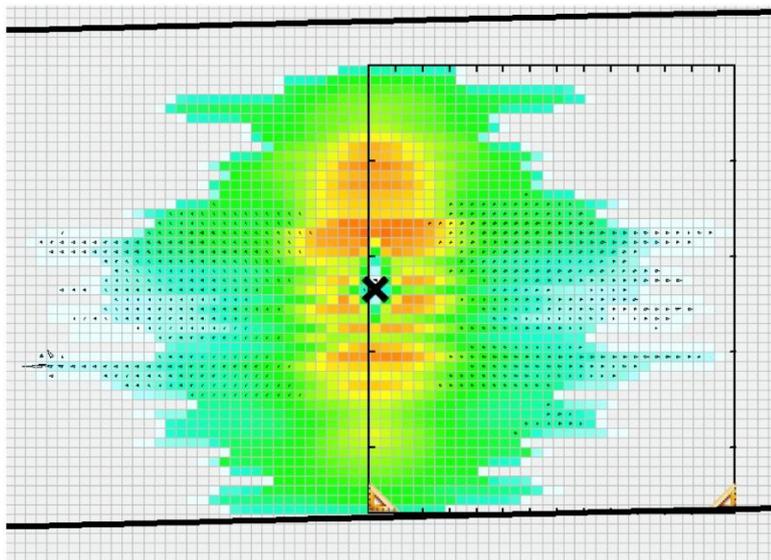


Рис. 2.16 – Приклад розрахунку Full 3D моделі тріщини

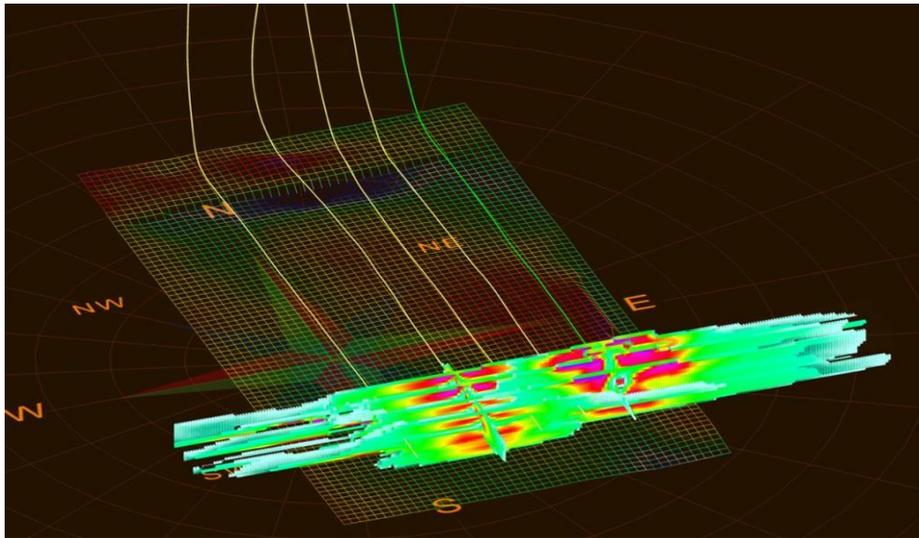


Рис. 2.17 – 3D Візуалізація тривимірної моделі тріщини гідравлічного розриву пласта

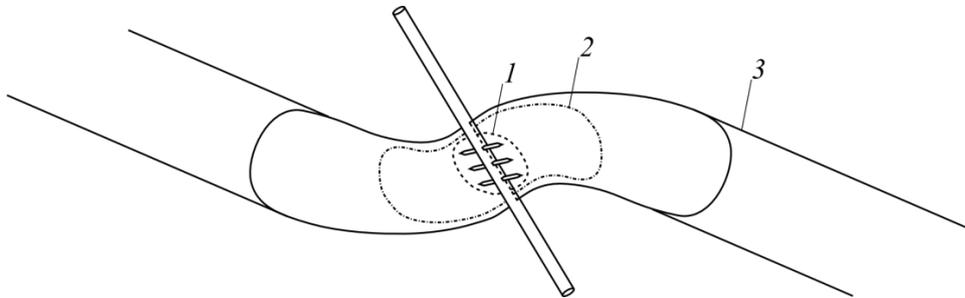
## 2.6 Основні етапи проектування гідравлічного розриву пласта

Гідророзрив пласта проходить через три основні стадії:

1. Перша стадія характеризується активацією материнської тріщини, утворюється на перфорованому інтервалі свердловини кандидата на ГРП;
2. Друга стадія супроводжується викривленням материнської тріщини у бік, перпендикулярному мінімальному напруженню;
3. Завершальна третя стадія визначає поширення тріщини вздовж магістрального напрямку розвитку на далекі відстані.

Якщо розглядати застосування вищерозглянутих математичних моделей, то третю стадію добре ілюструють одновимірні моделі, хоч і без руху тріщини по висоті. Зростання тріщини по вертикалі визначає псевдо-3D моделі. Другу стадію ГРП можуть описувати 2D та 3D моделі, а Planar 3D може розглядати першу та третю стадію без урахування фільтрації по ширині. Повноцінно всі стадії адекватно описувати можуть моделі Full 3D, включаючи ініціації тріщини.

Поки не було знайдено прикладів таких моделей, оскільки раніше висвітлювалося – проблема високих обчислювальних потужностей програмного і технічного устаткування.



1 - створення тріщини ГРП; 2 - викривлення тріщини ГРП у бік напрямку магістрального поширення; 3 - зростання тріщини ГРП у магістральному напрямку

Рис. 2.18 – Стадії гідророзриву пласта

Для наочності було створено докладну блок-схему етапу проектування ГРП (Рис. 2.19), де продемонстрували два важливі аспекти:

- Набір вихідних даних для проектування та проходження наступного етапу ГРП;
- Побудова математичної моделі тріщин ГРП, котрим підбираються необхідні технологічні параметри підготовки та проведення ГРП.



Рис. 2.19 – Блок-схема етапу проектування гідророзриву пласта

Прикладами сучасного симулятора ГРП на світовому ринку виступають програмні продукти "MFrac", "FRACPRO", "FracCADE", "StimPlan", "GOHFER", "Kinetix". На рис. 2.20 представлена розрахункову модель "Planar3D".

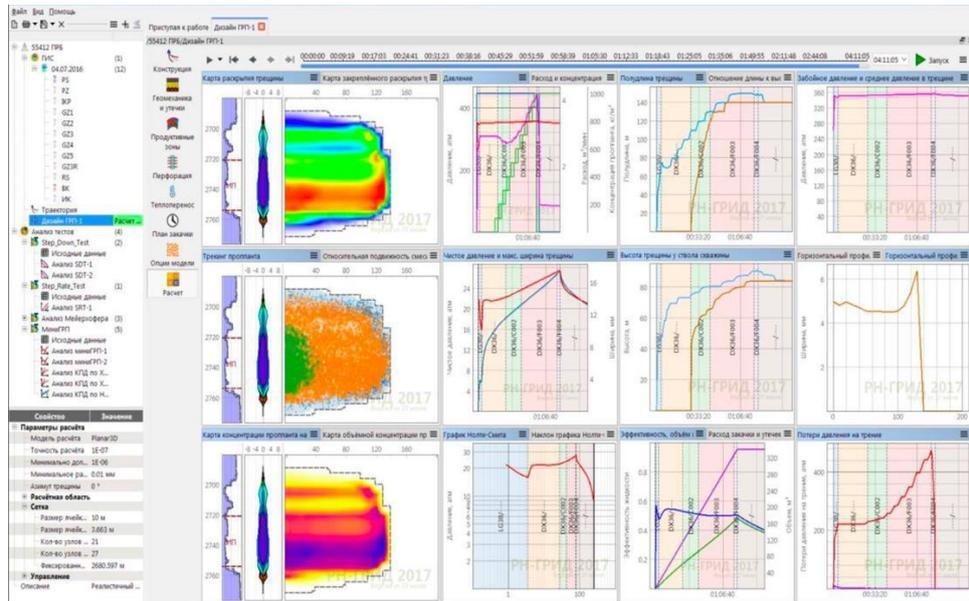


Рис. 2.20 – Приклад моделювання ГРП

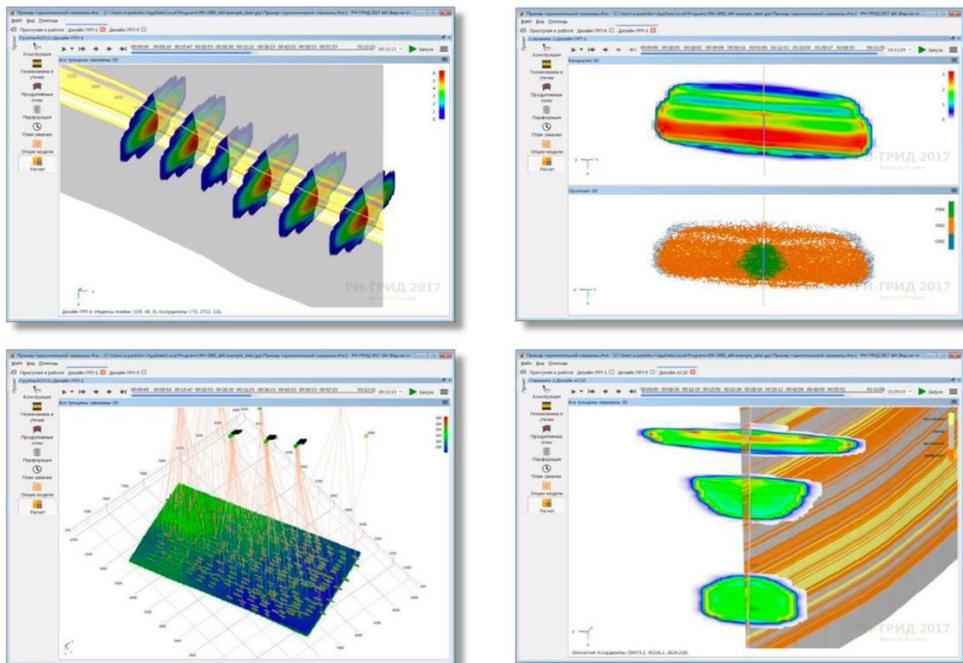


Рис. 2.21 – Приклад 3D візуалізація результатів моделювання.

## 2.7 Оцінка негативної тенденції проведення гідравлічного розриву

Проте трапляються випадки невдалого проведення ГРП, у результаті якого фактичні результати не досягали розрахункових, а найчастіше після ГРП - посилювали фактичний КВН.

Прикладом виступає нафтове родовище У1 з порово-тріщинуватим колектором і має тектонічні порушення. У зв'язку з низькою вивченістю геомеханічних властивостей порід та геологічних умов свердловини розрахункова модель геометрії тріщини ГРП відповідає фактичній. Тому фактичний результат видобутку менший, ніж планувалося згідно з розрахунками, а на одній свердловині і зовсім стався прорив води та заглишення свердловини [29].

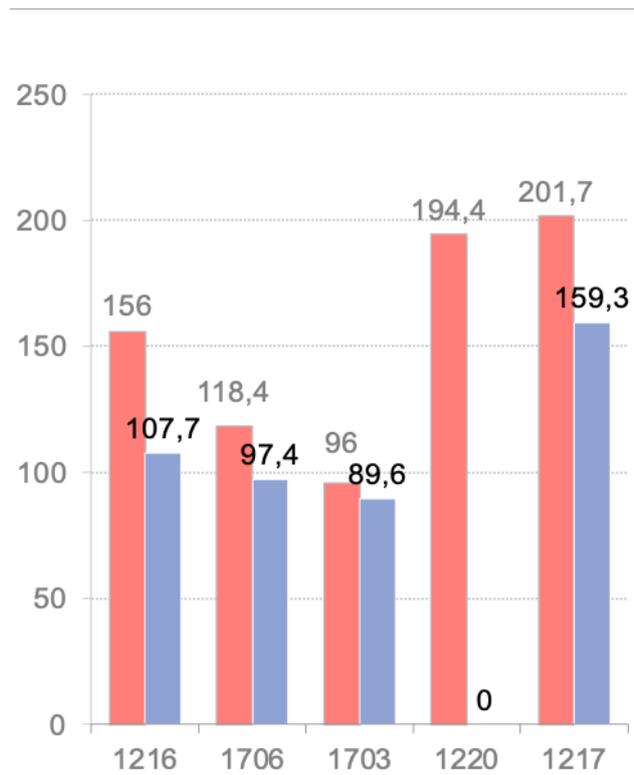


Рис.2.22 - Порівняння розрахункових дебітів із фактичними після ГРП на родовищі У1

Нафтове родовище Y2 має колектор порового типу надкутної товщі. У табл. 2.2 подано період проведення ГРП та його ефективність. Спостерігається тенденція зниження отримання додаткового припливу нафти через недосконалість системи ППД, забруднення привибійної зони свердловин [35].

Всі ці фактори важливо враховувати під час проектування математичної моделі тріщини ГРП з метою наближення фактичного КВН до проектного.

Ще одне явище, яке знижує успішність проведення ГРП у разі нагнітальних свердловин - автоГРП, індуковані тріщини гідророзриву, що утворюються при перевищенні розкриття тиску тріщин. Внаслідок автоГРП відбувається мимовільне зростання тріщини ГРП, що призводить до прориву води, що нагнітається, у видобувні свердловини і різке зростання обводненості [55].

Таблиця 2.2

Кількість ГРП та додатковий видобуток нафти на родовищі Y2

Рік	Кількість ГРП на працюючих свердловинах	Кількість ГРП всього	Додатковий видобуток нафти, тис. т
2015	16	37	195,6
2016	2	7	157,5
2017	3	13	117,1
2018	1	2	91,6
2019	1	16	73,6
2020	2	2	62
2021	0	7	46,8
2022	1	12	48,3

Ділянка X товщі родовища Y3 розробляється з використанням системи ППД і цьому об'єкті проводять процедури ГРП. Однак видобуток вуглеводнів ускладнився таким явищем, як автоГРП, що виявилось на

свердловинах нагнітальних. Це індуковані тріщини гідророзриву, що утворюються при перевищенні тиску розкриття тріщин. Через автоГРП відбувається мимовільне зростання тріщини ГРП, що призводить до прориву води, що нагнітається, у видобувні свердловини і різке зростання обводненості [56, 57]. У ході розробки не було враховано явище природного зростання тріщин після ГРП, у зв'язку з чим при автоГРП з тріщиною нагнітання води встановився гідродинамічний зв'язок із добувною свердловиною і пішов зростання обводненості та падіння дебіту нафти.

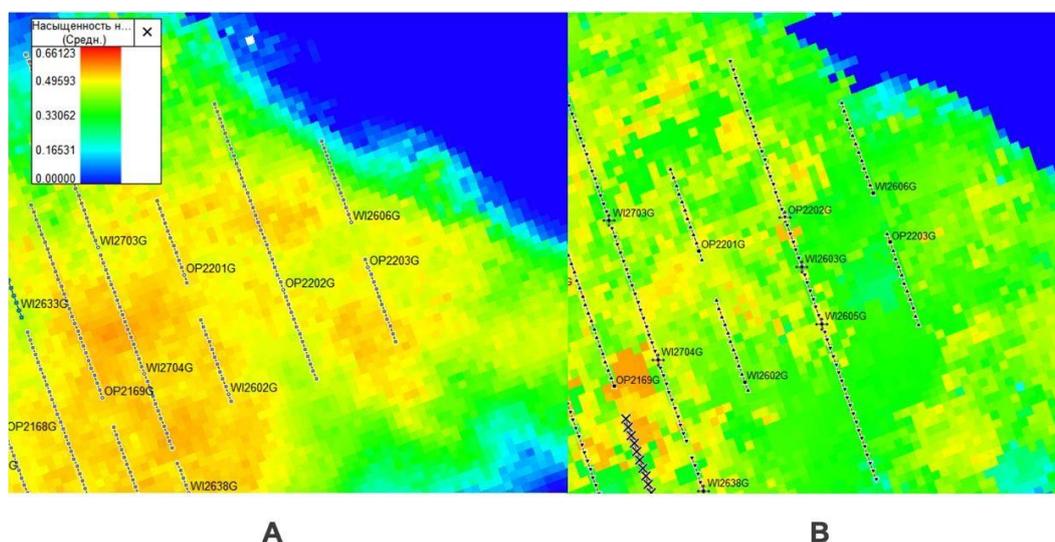


Рисунок 2.23 – Приклад зміни насиченості нафти з розвитком тріщини автоГРП на родовищі УЗ

Тому важливо враховувати ефект автоГРП під час проектування математичних моделей тріщин ГРП шляхом окремого моделювання процесу зростання тріщин автоГРП, щоб знизити ризики невдалого проведення ГРП та підвищити точність отримання розрахункової моделі тріщини ГРП. Це спричинить збільшення значення фактичного КВН і зменшення різниці його з проектним КІН [59].

Для оцінки ефективності проведення ГРП необхідно відстежувати низку критеріїв, які є орієнтиром всіх етапах ГРП, зокрема і вибір свердловини-кандидата для проведення ГРП. Головними ознаками

визначення свердловини, на якому можна проводити ГРП і отримати позитивні результати, тобто підвищення фактичного КВН, є середньо-високі пластові тиски, є рентабельні значення геологічних запасів вуглеводнів, сама товща має потужну продуктивну товщу з бар'єрами напруг (низкороникні ділянки). А сама свердловина має забруднення ПЗП, що характеризується позитивним скін-фактором [25].

Сучасний комплексний підхід до проектування ГРП вимагає розглядати ГРП не просто ГТМ для застосування короткочасного збільшення припливу рідини зі свердловини, а частина системи розробки нафтогазових родовищ. Завдяки цьому можна як локально, і узагальнено аналізувати техніко-економічну ефективність використання ГРП з урахуванням моніторингу поточного стану розробки родовищ [27]. А це, у свою чергу, підвищує ефективність як розрахунку проектного КВН, так і підвищення фактичного КВН шляхом успішного проведення ГРП.

## **Висновок до розділу 2**

У розділі виконано комплексний аналіз сучасних підходів до розрахунку проектного коефіцієнта видобування нафти та методів моделювання гідравлічного розриву пласта як одного з найбільш ефективних геолого-технічних заходів інтенсифікації видобування. Доведено, що коректне визначення проектного коефіцієнта видобування нафти можливе лише за умови інтегрованого врахування геолого-фізичних характеристик пласта, динаміки фільтраційних процесів і технологічних параметрів проведення гідравлічного розриву пласта.

У підрозділах 2.1 та 2.1.1 здійснено оцінку сучасних підходів і методик розрахунку коефіцієнта вилучення нафти. Встановлено, що емпіричні та аналітичні методи є доцільними на початкових етапах проектування, проте не забезпечують достатньої точності в умовах складної геологічної будови

колекторів. Найбільш обґрунтованими є чисельні методи, які дозволяють урахувати неоднорідність пласта, зміну його фільтраційних властивостей та вплив технологічних заходів на процес видобування.

У підрозділі 2.2 проаналізовано механізм впливу зміни гідропровідності пласта на формування коефіцієнта вилучення нафти. Показано, що гідравлічний розрив пласта суттєво змінює характер руху флюїдів, збільшує ефективну дренавану зону та інтенсивність відбору, що безпосередньо відображається на величині проектного коефіцієнта видобування. Водночас підкреслено необхідність урахування можливих негативних ефектів, пов'язаних з нерівномірним дренаванням покладу.

У підрозділі 2.3 обґрунтовано застосування методу матеріального балансу для розрахунку коефіцієнта вилучення нафти. Визначено, що цей метод є ефективним інструментом контролю достовірності результатів моделювання та оцінки енергетичного стану покладу, особливо при аналізі ефективності гідравлічного розриву пласта в процесі розробки родовища.

У підрозділах 2.4 та 2.4.1 розглянуто технологічні засади гідравлічного розриву пласта та обґрунтовано доцільність застосування моделей, сформованих на основі технологічних показників проведення ГРП на нафтових родовищах. Доведено, що адекватне врахування параметрів тріщини, властивостей пропанту та режимів закачування є визначальним чинником точності прогнозних розрахунків.

У підрозділі 2.5 проаналізовано застосування різних методів моделювання гідравлічного розриву пласта у процесі виконання геолого-технічних заходів. Встановлено, що найбільш ефективним є комплексний підхід, який поєднує геомеханічні, гідродинамічні та резервуарні моделі, що дозволяє отримати більш достовірну оцінку впливу ГРП на показники розробки родовища.

У підрозділі 2.6 систематизовано основні етапи проектування гідравлічного розриву пласта, що дало змогу визначити ключові стадії, на яких

прийняття обґрунтованих інженерних рішень має вирішальний вплив на ефективність заходу та величину проектного коефіцієнта видобування нафти.

У підрозділі 2.7 виконано оцінку негативних тенденцій проведення гідравлічного розриву пласта, зокрема можливого зниження довготривалої ефективності, погіршення фільтраційних властивостей пласта та виникнення техногенних ризиків. Це підтверджує необхідність застосування науково обґрунтованих методів моделювання та постійного аналізу результатів ГРП.

Загалом результати розділу підтверджують, що поєднання сучасних методів розрахунку проектного коефіцієнта видобування нафти з удосконаленими моделями гідравлічного розриву пласта є обов'язковою умовою підвищення ефективності розробки нафтових родовищ та обґрунтованості проектних рішень.

## **РОЗДІЛ 3 ВИМОГИ ДО КАДРОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄКТУ ГАЛУЗІ**

### **3.1 Вимоги до кадрового забезпечення фахівців інженерно-технічних центрів нафтової промисловості, які виконують роботи з моделювання гідравлічного розриву пласта.**

Ефективність застосування гідравлічного розриву пласта (ГРП) значною мірою визначається не лише рівнем розвитку технологій і програмних засобів моделювання, а й якістю кадрового забезпечення інженерно-технічних центрів нафтової промисловості. В умовах ускладнення геологічної будови родовищ, зростання частки важковидобувних запасів і підвищених вимог до обґрунтованості проектних рішень роль професійної підготовки фахівців, задіяних у моделюванні ГРП, набуває визначального значення.

#### **3.1.1 Загальні вимоги до професійної підготовки**

Фахівці інженерно-технічних центрів, які виконують роботи з моделювання гідравлічного розриву пласта, повинні мати вищу технічну освіту за напрямками «Нафтогазова інженерія», «Геологія», «Геофізика», «Гідродинаміка» або суміжними спеціальностями. Базова підготовка має включати глибокі знання з фізики пласта, фільтрації флюїдів у пористих середовищах, механіки гірських порід, термодинаміки та основ розробки нафтових і газових родовищ.

Окрему увагу слід приділяти володінню сучасними методами математичного та чисельного моделювання, які є основою для прогнозування ефективності ГРП та оцінки його впливу на коефіцієнт видобування нафти.

#### **3.1.2 Вимоги до спеціалізованих знань і компетенцій**

Фахівці, залучені до моделювання ГРП, повинні володіти:

- знаннями геомеханічних моделей пласта та закономірностей ініціації і поширення тріщин;
- навичками аналізу та інтерпретації геолого-геофізичних даних, кернових і промислових досліджень;
- умінням працювати з гідродинамічними та резервуарними моделями для оцінки впливу ГРП на показники розробки;
- розумінням технологічних параметрів ГРП (тиск і швидкість закачування, тип і концентрація пропанту, властивості рідини розриву) та їх впливу на результати моделювання.

Важливою складовою є здатність оцінювати невизначеності вихідних даних і виконувати сценарні розрахунки з метою вибору оптимальних проектних рішень.

### 3.1.3 Вимоги до практичних навичок і програмного забезпечення

Кадрове забезпечення інженерно-технічних центрів має передбачати наявність фахівців, які володіють практичними навичками роботи з сучасними програмними комплексами для моделювання ГРП та гідродинамічних процесів у пласті. Це включає:

- побудову та калібрування моделей на основі промислових даних;
- інтеграцію результатів моделювання ГРП у загальні моделі розробки родовищ;
- аналіз результатів після проведення геолого-технічних заходів і коригування проектних параметрів.

Практичний досвід участі в проектуванні та супроводі ГРП є важливою перевагою та сприяє підвищенню якості прийняття інженерних рішень.

#### Вимоги до міждисциплінарної взаємодії

Моделювання гідравлічного розриву пласта потребує тісної взаємодії між спеціалістами різних профілів: геологами, геофізиками, технологами, розробниками та економістами. У зв'язку з цим фахівці інженерно-технічних центрів повинні мати навички командної роботи, технічної комунікації та

здатність інтегрувати результати різних напрямів у єдину проектну концепцію.

### 3.1.4 Вимоги до підвищення кваліфікації та професійного розвитку

З огляду на швидкий розвиток технологій ГРП та методів моделювання, система кадрового забезпечення повинна включати безперервне підвищення кваліфікації фахівців. Це передбачає:

- регулярне проходження спеціалізованих курсів і тренінгів;
- ознайомлення з новими програмними продуктами та методиками;
- участь у науково-технічних конференціях і виробничих семінарах;
- вивчення результатів передового вітчизняного та зарубіжного досвіду.

### **Висновок до розділу 3**

Таким чином, кадрове забезпечення інженерно-технічних центрів нафтової промисловості, що виконують роботи з моделювання гідравлічного розриву пласта, повинно базуватися на поєднанні ґрунтовної теоретичної підготовки, практичного досвіду, володіння сучасними інструментами моделювання та здатності до міждисциплінарної взаємодії. Реалізація цих вимог є необхідною умовою підвищення обґрунтованості проектних рішень, ефективності геолого-технічних заходів і рівня видобування нафти на сучасних родовищах.

## РОЗДІЛ 4

# РОЗРОБКА ДИДАКТИЧНОГО ПРОЄКТУ ВИКЛАДАННЯ ТЕМИ «МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРИВУ ПЛАСТА», ЩО ВИВЧАЄТЬСЯ У ПРОЦЕСІ ПІДВИЩЕННЯ КВАЛІФІКАЦІЇ ФАХІВЦІВ ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНОГО ЦЕНТРУ

### 4.1. Вихідні дані

Розробка ефективного дидактичного проєкту для підвищення кваліфікації фахівців інженерно-технічного центру має базуватися на аналізі сучасних технологічних процесів, професійного досвіду слухачів, їхніх компетенцій, а також на технічних можливостях навчальної установи або корпоративного освітнього центру. Ці параметри визначають структуру, зміст і методи навчання, спрямовані на формування високої професійної підготовки фахівців у сфері моделювання ГРП та оцінки ризиків при проведенні технологічних операцій.

**Цільова аудиторія навчання:** програма орієнтована на інженерно-технічний персонал, який здійснює:

- розробку та аналіз моделей гідравлічного розриву пласта;
- оцінку впливу технологічних параметрів на безпеку та ефективність ГРП;
- прогнозування та управління ризиками деградації продуктивного пласта;
- аналіз результатів цифрового моделювання та створення рекомендацій для оптимізації робіт;
- підготовку звітів та висновків щодо безпечного проведення ГРП.

**Категорії слухачів:** до програм підвищення кваліфікації залучаються:

- інженери з середньою та вищою кваліфікацією, які працюють із моделюванням ГРП та геолого-технологічним аналізом;

- фахівці з управління виробничими процесами та контролю безпеки нафтогазових об'єктів;
- аналітики та молодші інженери, що готують цифрові моделі та аналізують технічні дані;
- спеціалісти, які відповідають за прогнозування залишкового ресурсу свердловин та розробку технологічних карт ГРП.

**Рівень попередньої підготовки слухачів:** учасники програм, як правило, мають:

- базові знання з гідродинаміки, механіки руйнування порід, матеріалознавства та цифрового моделювання;
- розуміння принципів роботи технологічних систем і інструментів моделювання ГРП;
- досвід роботи з технічною документацією, регламентами безпеки та аналітичними звітами;
- навички оцінки ризиків та ідентифікації критичних станів пласта;

**Місця роботи слухачів (типи підприємств):**

- нафтогазові компанії та їхні дослідні та технологічні підрозділи;
- сервісні організації, що виконують моделювання, контроль та оптимізацію ГРП;
- навчальні та науково-дослідні інститути з лабораторіями цифрового моделювання;
- технологічні центри, що займаються розробкою і тестуванням програмного забезпечення для ГРП.

**Місце підвищення кваліфікації:**

1. Корпоративні навчальні центри нафтогазових компаній з лабораторіями моделювання та цифровими симуляторами.
2. Профільні університети та інститути післядипломної освіти з курсами гідродинаміки, механіки руйнування порід та цифрового моделювання.

3. Науково-дослідні та експертні центри з практичними лабораторними модулями для моделювання ГРП.

**Тривалість програм:** програми можуть тривати від 1 до 4 місяців залежно від рівня попередньої підготовки слухачів і глибини вивчення цифрового моделювання та практичних модулів. Для поглиблених курсів рівня експерта можлива тривалість до 6 місяців.

**Форми організації навчального процесу:**

- лекційні заняття з теоретичних основ гідродинаміки, механіки руйнування порід та цифрового моделювання;
- практичні роботи на цифрових платформах, аналіз симуляційних результатів, моделювання нестандартних сценаріїв ГРП;
- лабораторні модулі з реалістичними моделями пласта та гідравлічними стендами;
- тренажерні заняття та кейс-методи з відпрацюванням аварійних ситуацій та оцінки ризиків;
- робота з цифровими симуляторами та аналітичними інструментами прогнозування;
- самостійна робота, включаючи вивчення нормативної документації, методик оцінки пласта та аналітичних звітів.

**4.2. Види та зміст професійної діяльності фахівця**

Аналіз професійної діяльності фахівців інженерно-технічного центру наведений в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Аналіз професійної діяльності фахівця

Вид діяльності	Функції діяльності	Процес діяльності
Моделювання ГРП	Розробка цифрових моделей гідравлічного розриву пласта, оцінка параметрів пласта та технологічних рідин,	Збір вихідних геолого-технологічних даних, формування цифрової моделі, симуляція процесів ГРП, аналіз результатів та корекція параметрів

1	2	3
	прогнозування ефективності операцій	
Аналіз ризиків та безпеки	Ідентифікація потенційних аварійних сценаріїв, оцінка критичних станів пласта та технологічних систем, розробка рекомендацій для мінімізації ризиків	Моніторинг технологічних параметрів, оцінка впливу технологічних рішень, розробка заходів щодо безпечного проведення ГРП
Розробка технологічних рішень	Планування послідовності операцій ГРП, вибір обладнання та технологічних рідин, визначення оптимальних режимів роботи	Аналіз характеристик свердловини та пласта, моделювання технологічних сценаріїв, складання планів проведення ГРП та рекомендацій щодо їх оптимізації
Контроль і оцінка результатів	Перевірка точності моделей та ефективності проведених операцій, корекція методик моделювання	Збір даних з промислових випробувань, порівняння з результатами моделювання, аналіз відхилень та корекція підходів
Навчання та підвищення кваліфікації	Формування компетенцій співробітників, впровадження нових методик моделювання та цифрових технологій	Проведення тренінгів, лабораторних та практичних занять, робота з цифровими платформами, оцінка рівня засвоєння знань

### 4.3. Кваліфікаційні вимоги до фахівців інженерно-технічного центру

Кваліфікаційні вимоги до фахівців інженерно-технічного центру представлені в таблиці 4.2.

## Кваліфікаційні вимоги до фахівця

Фахівець повинен уміти	Фахівець повинен знати
1	2
Проводити цифрове моделювання гідравлічного розриву пласта та оцінювати ефективність технологічних рішень	Основи гідродинаміки та механіки пласта, принципи роботи ГРП, властивості технологічних рідин
Аналізувати ризики проведення операцій та розробляти заходи з безпеки	Норми промислової та екологічної безпеки, стандарти ISO, API, EN, методи оцінки ризиків
Використовувати програмне забезпечення для симуляції процесів та прогнозування результатів	Принципи роботи цифрових платформ, алгоритми моделювання, інтерпретація результатів симуляцій
Розробляти технологічні карти та інструкції проведення ГРП	Конструктивні особливості обладнання, параметри насосних систем, технологічні режими та процедури контролю
Проводити аналіз результатів моделювання та коригувати параметри операцій	Методи математичного та статистичного аналізу, принципи роботи з базами даних та звітною документацією
Проводити навчання молодших спеціалістів та надавати рекомендації з оптимізації робіт	Сучасні підходи до підвищення кваліфікації, методики навчання, сучасні технології моделювання та прогнозування
Виконувати експертну оцінку сценаріїв аварійних ситуацій та пропонувати превентивні заходи	Механізми деградації пласта та обладнання, принципи аварійного реагування та превентивних заходів

#### 4.4. Постановка цілей вивчення навчальної теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта»

Формування у фахівців інженерно-технічного центру компетентностей для точного моделювання гідравлічного розриву пласта, оцінки ефективності технологічних рішень і забезпечення безпеки проведення ГРП.

## Цілі-задачі на окремих етапах досягнення оперативних цілей

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми	Цілі-задачі на окремих етапах досягнення оперативних цілей.
1	2
I, II, III, IV	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Вивчити конструктивні особливості свердловин та насосних установок.</li> <li>– Опанувати основні параметри технологічних рідин і їх вплив на пласти.</li> <li>– Ознайомитися з нормативними документами та стандартами (ISO, API, EN) щодо ГРП.</li> <li>– Вивчити фізико-механічні процеси під час гідравлічного розриву пласта.</li> <li>– Освоїти основи цифрового моделювання та алгоритми прогнозування результатів.</li> <li>– Розібрати ключові сценарії аварій та їх наслідки для безпеки.</li> <li>– Проводити симуляцію ГРП на цифрових платформах і спеціалізованому ПЗ.</li> <li>– Оцінювати ефективність технологічних рішень і їх вплив на параметри пласта.</li> <li>– Відпрацьовувати процедури контролю та безпеки при моделюванні.</li> <li>– Аналізувати отримані дані для оптимізації технологічних схем.</li> <li>– Розробляти рекомендації щодо режимів роботи та заходів безпеки.</li> <li>– Прогнозувати ризики та розробляти превентивні стратегії для мінімізації аварій.</li> <li>– Проводити комплексний аналіз навчальних кейсів.</li> <li>– Формувати технічні висновки і рекомендації щодо оптимізації ГРП.</li> <li>– Оцінювати власну готовність до виконання експертних функцій у реальних умовах.</li> </ul>

#### **4.5. Перелік літературних джерел з теми.**

1. Economides, M. J., Nolte, K. G. *Reservoir Stimulation*. 3rd Edition. John Wiley & Sons, 2015. – Класичний підручник з технології ГРП, включає методи моделювання та аналіз ефективності стимуляційних робіт.
2. Montgomery, C. T., Smith, M. B. *Hydraulic Fracturing: History of an Enduring Technology*. Journal of Petroleum Technology, 2010, Vol. 62(12), pp. 26–37. – Огляд історії та сучасних практик проведення ГРП, включаючи цифрові моделі та симуляції.
3. Warpinski, N. R., Mayerhofer, M. J. *Hydraulic Fracture Modeling and Simulation Techniques*. Society of Petroleum Engineers, 2017. – Практичне керівництво з методів моделювання гідравлічного розриву пласта та аналізу його наслідків.
4. Chenevert, M. E., Dusseault, M. B. *Petroleum Engineering Handbook: Reservoir Engineering and Hydraulic Fracturing*. Society of Petroleum Engineers, 2018. – Сучасний довідник з інженерної підготовки фахівців, охоплює теоретичні та прикладні аспекти моделювання ГРП.

#### **4.6. Конструювання дидактичних матеріалів з теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта»**

Процес створення дидактичних матеріалів з теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта» передбачає систематичне поєднання теоретичного змісту, практичних прикладів і навчальних завдань, що забезпечують формування професійних компетентностей слухачів інженерно-технічного центру. Основна мета дидактичних матеріалів полягає у забезпеченні ефективного засвоєння знань про принципи гідравлічного розриву пласта, методи моделювання, безпечне проектування та оцінку наслідків стимуляційних робіт.

Конструювання дидактичних матеріалів включає такі ключові компоненти:

## **1. Теоретичні матеріали.**

– Пояснення фізичних процесів, що відбуваються при гідравлічному розриві пласта.

– Опис методів моделювання, включаючи чисельні та аналітичні підходи.

– Висвітлення нормативних і безпекових вимог, стандартів ISO, API та EN.

## **2. Візуальні і мультимедійні ресурси.**

– Схеми та графіки розривів, карти напружень, профілі тріщин.

– Анімації та цифрові симулятори, що відтворюють процес розриву та поширення тріщин.

– Відео з демонстрацією лабораторних та польових експериментів.

## **3. Практичні завдання та кейси.**

– Розрахунки параметрів розриву пласта та прогнозування продуктивності свердловини.

– Аналіз реальних аварійних ситуацій та методів їх запобігання.

– Робота з цифровими моделями для відпрацювання навичок прийняття рішень у безпечних умовах.

## **4. Контрольні матеріали та тести.**

– Питання для перевірки засвоєння теоретичного матеріалу.

– Завдання для оцінки умінь працювати з програмними засобами моделювання.

– Критеріальні таблиці для самостійної оцінки виконання практичних завдань.

## **5. Методичні рекомендації для викладача.**

– Послідовність подання теми: від базових понять до складних практичних кейсів.

– Вказівки щодо інтеграції теоретичного матеріалу з практичними вправами та симуляціями.

– Рекомендації щодо використання цифрових платформ для моделювання та аналізу результатів.

Дидактичні матеріали розробляються з урахуванням сучасних освітніх технологій і передбачають інтерактивну взаємодію слухачів з навчальним контентом. Їхня структура спрямована на поетапне нарощування знань і навичок: від розуміння фізичних процесів до здатності застосовувати методи моделювання для оцінки безпечності та ефективності проведення ГРП.

Таким чином, правильно сконструйовані дидактичні матеріали забезпечують комплексне формування професійних компетентностей інженерів, сприяють підвищенню їх практичних умінь і дозволяють ефективно інтегрувати сучасні цифрові та симуляційні технології в процес навчання.

#### **4.7. Аналіз базових умов навчання з теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта»**

Аналіз базового навчального матеріалу з теми представлені в таблиці табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Аналіз базового матеріалу і способи актуалізації базових знань

Перелік базових понять, законів, способів дії	Способи (методи, форми, засоби) перевірки рівня сформованості базових знань і способів дій
1	2
Тема 1: Основи геології та механіки порід	Методи: усне опитування. Форми: фронтальна. Засоби: контрольні питання. 1. Які основні механічні властивості гірських порід впливають на процес гідравлічного розриву? 2. Як пористість і проникність пласта визначають ефективність ГРП?

1	2
	<p>3. В чому полягає різниця між пружною та пластичною деформацією порід при впливі тиску?</p> <p>4. Які фактори геологічної будови можуть ускладнити проведення ГРП?</p> <p>5. Як визначають напрямок і розповсюдження тріщин у пористих пластах?</p>
<p>Тема 2: Фізика та гідравліка гідравлічного розриву пласта</p>	<p>1. Які фізичні процеси відбуваються під час створення тріщин у пласті?</p> <p>2. Як тиск та об'єм рідини впливають на розповсюдження тріщин?</p> <p>3. Які закони гідравліки застосовуються для моделювання потоків у тріщинах?</p> <p>4. Як визначають критичний тиск для ініціювання розриву пласта?</p> <p>5. В чому полягає роль в'язкості та щільності промивальної рідини у ГРП?</p>
<p>Тема 3: Методи моделювання гідравлічного розриву</p>	<p>1. Які аналітичні методи застосовуються для прогнозування тріщин у пластах?</p> <p>2. Чим чисельне моделювання відрізняється від аналітичного підходу?</p> <p>3. Які параметри необхідно враховувати при комп'ютерному моделюванні ГРП?</p> <p>4. Як цифрові платформи допомагають оцінити залишковий ресурс пласта?</p> <p>5. Які обмеження мають існуючі моделі гідравлічного розриву?</p>
<p>Тема 4: Матеріалознавство та хімія промивальних рідин</p>	<p>1. Які фізико-хімічні властивості рідин впливають на ефективність ГРП?</p> <p>2. Як взаємодіють полімерні добавки з гірськими породами?</p> <p>3. Які критерії вибору матеріалів для обладнання ГРП?</p> <p>4. Як хімічний склад рідини впливає на безпеку та екологічність процесу?</p> <p>5. В чому полягає роль корозійної стійкості обладнання при роботі з агресивними рідинами?</p>

1	2
Тема 5: Безпека та нормативно-технічне регулювання ГРП	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Які міжнародні стандарти регламентують проведення ГРП?</li> <li>2. Які основні промислові ризики пов'язані з гідравлічним розривом пласта?</li> <li>3. Як оцінюють критичні точки для безпечного виконання робіт?</li> <li>4. В чому полягає принцип ризик-орієнтованого підходу у плануванні ГРП?</li> <li>5. Які заходи безпеки повинні бути включені у технологічний процес?</li> </ol>

**4.8. Проєктування мотиваційних технологій** навчання з теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта», характеристика і текст мотивації, використання якої доцільно при викладанні навчального матеріалу (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

## Обрання методів мотивації навчальної діяльності

Вид і методи мотивації	Вступна мотивація
1	2
Вступна мотивація, мотивуючий вступ	<p>Доброго дня, шановні слухачі! Сучасне нафтовидобування потребує високого рівня технічної компетентності та точності у проведенні операцій, що безпосередньо впливають на ефективність розробки родовищ. Однією з ключових технологій у видобутку нафти та газу є гідравлічний розрив пласта (ГРП), який дозволяє суттєво підвищити продуктивність свердловин та оптимізувати видобуток ресурсів. Проте, проведення ГРП пов'язане з високими технологічними, екологічними та безпековими ризиками, що робить підготовку фахівців критично важливою.</p> <p>Мотивація до вивчення теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта» ґрунтується на необхідності формування компетентностей, що забезпечують точне прогнозування поведінки</p>

1	2
	<p>пласта, оптимізацію технологічних параметрів та мінімізацію потенційних негативних наслідків. Застосування цифрових моделей та симуляційних платформ дозволяє інженерам оцінювати ефективність та безпеку проведення ГРП ще на етапі планування, знижуючи ризики помилок і аварій.</p> <p>Оволодіння методами моделювання ГРП формує у фахівців аналітичне мислення, здатність працювати з великими обсягами даних та приймати рішення на основі комплексної оцінки параметрів пласта та технологічних систем. Ця тема мотивує до розвитку практичних навичок роботи з цифровими інструментами, а також до інтеграції знань з гідродинаміки, матеріалознавства та інженерної безпеки.</p> <p>Таким чином, навчання за цією темою сприяє підвищенню професійного рівня інженерів, забезпечує ефективну та безпечну експлуатацію свердловин, а також підготовку до прийняття рішень у складних виробничих ситуаціях, що робить тему актуальною та практично значущою для розвитку нафтової промисловості.</p>

**4.9. Проєктування технології формування орієнтовної основи діяльності** при вивченні теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта» (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

## Способи формування ООД з теми

№ з/п	Рівні засвоєння навчального матеріалу (за Блумом)	Форми навчання	Методи та засоби навчання
1	2	3	4
1	Знання та розуміння: ознайомлення з принципами ГРП, механікою пласта, фізико-хімічними процесами.	Лекції, семінари	Лекційні доповіді, презентації, інтерактивні обговорення, наочні схеми, відеоогляди процесу ГРП

Продовження табл. 4.6

1	2	3	4
2	Застосування: використання базових моделей для прогнозування розриву пласта та обчислення технологічних параметрів.	Практичні заняття, лабораторні роботи	Розв'язання прикладних задач, комп'ютерне моделювання, робота з цифровими симуляторами
3	Аналіз: дослідження впливу параметрів на ефективність і безпеку ГРП, порівняння результатів моделювання з реальними даними.	Групові семінари, кейс-стаді	Аналіз кейсів, порівняння моделей, розбір типових помилок, дискусії
4	Синтез: розробка оптимальних технологічних рішень для конкретних умов свердловин на основі моделювання.	Практикуми, проектні роботи	Створення власних моделей, розробка сценаріїв ГРП, інтеграція знань з гідравліки, механіки, матеріалознавства
5	Оцінка та прогнозування: оцінка ризиків, прогнозування наслідків ГРП та прийняття обґрунтованих інженерних рішень.	Дискусії, тренінги, моделювання складних ситуацій	Симуляції аварійних або нестандартних режимів, оцінка результатів моделювання, обґрунтування рішень, робота з аналітичними інструментами

**4.10. Проектування технології формування виконавчих дій при вивченні теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта» (табл. 4.7).**

## Способи формування виконавчих дій з теми

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми	Форми	Методи, засоби закріплення
1	2	3
I, II, III, IV	Колективна-групова	<p><b>Вправа 1. Аналіз геологічних та фізико-механічних характеристик пласта</b>  <b>Мета:</b> Навчитися оцінювати вплив властивостей пласта на процес ГРП.  <b>Завдання:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вивчити надані геологічні дані свердловини (глибина, тиск, пористість, проникність).</li> <li>2. Визначити механічні властивості порід (міцність на стиск, модуль пружності).</li> <li>3. Проаналізувати, як властивості пласта впливають на можливість формування тріщин при ГРП.  <b>Результат:</b> Звіт з розрахунками та схемою прогнозованого поширення тріщин.</li> </ol> <p><b>Вправа 2. Побудова базової моделі ГРП</b>  <b>Мета:</b> Навчитися створювати комп'ютерну модель розриву пласта.  <b>Завдання:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Використати цифровий симулятор або спеціалізоване ПЗ (наприклад, FracPro або Eclipse).</li> <li>2. Ввести дані про пласт, флюїд та технологічні параметри (тиск, об'єм рідини, швидкість закачування).</li> <li>3. Провести первинне моделювання та візуалізувати утворення тріщин.  <b>Результат:</b> Схема моделі та графіки розподілу тиску і відкриття тріщин.</li> </ol>

1	2	3
		<p>Вправа 3. Вплив параметрів закачування на ефективність ГРП          Мета: Навчитися оцінювати чутливість процесу ГРП до технологічних параметрів.          Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Використати базову модель з Вправи 2.</li> <li>2. Змінювати параметри: швидкість закачування, об'єм рідини, тиск, вязкість рідини.</li> <li>3. Проаналізувати, як зміни впливають на розмір і напрямок тріщин.</li> </ol> <p>Результат: Таблиця порівняння параметрів та графічне представлення впливу на ефективність ГРП.</p> <p>Вправа 4. Моделювання екстремальних ситуацій          Мета: Навчитися передбачати ризики та запобігати аварійним ситуаціям.          Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Використати комп'ютерну модель для створення сценаріїв підвищеного тиску або нестабільності пласта.</li> <li>2. Виявити критичні точки, де можливе порушення цілісності пласта.</li> <li>3. Розробити рекомендації щодо зміни параметрів закачування для уникнення аварій.</li> </ol> <p>Результат: Звіт з аналізом ризиків та пропозиціями щодо оптимізації ГРП.</p> <p>Вправа 5. Оптимізація технологічного процесу ГРП          Мета: Розробити комплексне рішення для підвищення ефективності та безпеки операції.          Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Використати результати попередніх вправ.</li> <li>2. Підібрати оптимальні параметри закачування та вибір флюїду для конкретного пласта.</li> <li>3. Скласти модель прогнозу видобутку та довгострокової стабільності тріщин.</li> </ol> <p>Результат: Комплексна оптимізована модель ГРП із зазначенням технологічних параметрів і прогнозованих результатів.</p>

1	2	3
		<p>Вправа 6. Аналіз та презентація результатів моделювання</p> <p>Мета: Навчитися формувати професійні висновки та презентації технічних результатів.</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Підготувати звіт із результатами всіх моделювань (схеми, графіки, таблиці).</li> <li>2. Представити обґрунтування вибору параметрів та рекомендації щодо безпечного проведення ГРП.</li> <li>3. Провести групову дискусію для обговорення альтернативних рішень.</li> </ol> <p>Результат: Презентація з технічним аналізом та рекомендаціями для інженерної команди.</p>

**4.11. Проектування контрольних дій** з теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта» (таблиця 4.8).

Таблиця 4.8

## Засоби контролю по темі

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми	Форми	Методи, засоби
1	2	3
I, II, III	Колективно - індиві	<p>Контрольні питання.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Які основні параметри пласта необхідно враховувати при моделюванні гідравлічного розриву?</li> <li>2. Як механічні властивості порід впливають на процес утворення тріщин?</li> <li>3. Назвіть основні типи моделей ГРП, які використовуються у сучасному інженерному програмному забезпеченні.</li> <li>4. Які характеристики флюїду визначають ефективність проведення ГРП?</li> </ol>

1	2	3
		<p>5. Як відрізняються підходи до моделювання для пластів різної геологічної будови?</p> <p>6. Який вплив має тиск закачування на довжину і ширину тріщин?</p> <p>7. Як зміна об'єму закачуваної рідини впливає на ефективність ГРП?</p> <p>8. В яких випадках використовують багатофазні рідини для моделювання розриву пласта?</p> <p>9. Які ризики виникають при перевищенні критичного тиску закачування?</p> <p>10. Як змінюється процес ГРП при зміні в'язкості робочого флюїду?</p> <p>11. Які цифрові платформи і симулятори застосовуються для моделювання ГРП?</p> <p>12. Які критерії ефективності моделі використовуються для прийняття інженерного рішення?</p> <p>13. Які основні ризики виникають під час проведення ГРП та як їх передбачати у моделі?</p> <p>14. Як моделювання допомагає запобігти аварійним ситуаціям під час ГРП?</p> <p>15. Назвіть методи контролю і моніторингу безпеки процесу гідравлічного розриву.</p> <p>16. Як результати моделювання впливають на планування технологічних операцій?</p> <p>17. Які фактори враховують при прогнозуванні тріщиноутворення для багат шарових пластів?</p> <p>18. Як обирають оптимальні параметри закачування для підвищення ефективності ГРП?</p> <p>19. Які показники враховують при оцінці ефективності моделі ГРП?</p> <p>20. Опишіть методику аналізу чутливості процесу до зміни технологічних параметрів.</p> <p>21. Які стратегії використовують для мінімізації ризиків при моделюванні?</p> <p>Як поєднання цифрових симуляторів і реальних даних підвищує точність прогнозу?</p>

**4.12. Розробка програми курсів підвищення кваліфікації** викладання теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта» представлено в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9

## Програма курсів підвищення кваліфікації

№ з/п	Назва заняття	Термін заняття (год.)	Цілі заняття	Тип заняття	Методи навчання
1	Вступ до гідравлічного розриву пласта	2	Ознайомити слухачів із базовими поняттями, історією розвитку та сучасними підходами до ГРП	Лекція	Лекційний матеріал, презентація, обговорення
2	Геологічні та фізико-механічні характеристики пласта	4	Розвинути навички оцінки механічних властивостей порід і параметрів пласта для моделювання ГРП	Лекція + практикум	Аналіз даних, робота з таблицями і картами, групове обговорення
3	Флюїди та технологічні параметри ГРП	3	Сформувати знання про типи флюїдів, їх властивості та вплив технологічних параметрів на ефективність ГРП	Лекція + семінар	Демонстрації, розрахункові вправи, дискусії
4	Цифрове моделювання ГРП	5	Навчити створювати комп'ютерні моделі пласта та симуляції ГРП	Практикум	Робота з програмними симуляторами, моделювання, аналіз результатів
5	Аналіз результатів та оцінка ефективності ГРП	3	Розвинути навички інтерпретації результатів моделювання та прийняття рішень	Практикум	Кейси, обговорення, робота з графіками та діаграмами

Продовження табл. 4.9

1	2	3	4	5	6
6	Безпека та ризик-менеджмент у ГРП	2	Сформувати знання щодо потенційних ризиків та методів їх запобігання	Лекція + семінар	Розбір аварійних ситуацій, групові дискусії, тренінг з оцінки ризиків
7	Оптимізація технологічного процесу ГРП	3	Навчити методам підбору оптимальних параметрів ГРП для підвищення продуктивності та безпеки	Практикум	Моделювання різних сценаріїв, аналіз ефективності, групова робота
8	Підсумкове заняття та інтеграційний кейс	4	Узагальнити отримані знання та відпрацювати комплексне моделювання ГРП на прикладі реального пласта	Практикум	Комплексний кейс, робота у групах, презентація результатів, обговорення рішень

#### 4.13. Розробка сценарію заняття «Флюїди та технологічні параметри

ГРП»

Таблиця 4.10

Сценарій заняття

№ з/п	Структурні елементи заняття	Зміст структурних елементів
1	2	3
1	Організаційна частина (5 хвилин)	Привітання слухачів, перевірка присутності, ознайомлення з метою та структурою заняття. Короткий огляд попередньо вивченого матеріалу та його зв'язку з новою темою.
2	Вступна частина (10 хвилин)	Обговорення значення флюїдів у процесі ГРП та ролі технологічних параметрів. Демонстрація прикладів застосування різних типів флюїдів (водні, гелеобразні, полімірні) та їх вплив на ефективність розриву пласта.
3	Теоретична частина (30 хвилин)	- Характеристика основних типів флюїдів для ГРП та їх фізико-хімічні властивості. - Вплив в'язкості, щільності, фільтраційної здатності та стабільності на процес розриву пласта. - Огляд основних технологічних параметрів: тиск закачування, об'єм та швидкість витрати флюїду, кількість пропантів. - Взаємозв'язок між властивостями пласта та підбором флюїду та параметрів ГРП.
4	Практична частина (45 хвилин)	- Розрахунок оптимальних параметрів флюїду для конкретного пласта на основі заданих даних (глибина, пористість, проникність). - Симуляція процесу ГРП на цифровому тренажері з можливістю змінювати параметри флюїду та тиск. - Аналіз результатів моделювання та обговорення впливу змін параметрів на ефективність розриву пласта. - Робота у групах: підбір флюїду для заданих умов та презентація обґрунтування вибору.
5	Заключна частина (10 хвилин)	Підсумок заняття, обговорення практичних висновків та помилок, відповіді на запитання слухачів. Формулювання ключових висновків про вибір флюїдів та технологічних параметрів для ГРП. Завдання для самостійного опрацювання: аналіз кейсів з реальних свердловин та підбір оптимальних параметрів.

## Висновки до розділу 4

1. Розробка дидактичного проєкту викладання теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта» дозволяє систематизувати навчальний матеріал, визначити ключові компетентності, які повинні опанувати слухачі, та спрямувати навчальний процес на практичне застосування знань у професійній діяльності інженерно-технічного персоналу.

2. Аналіз професійної діяльності фахівців інженерно-технічного центру показав, що успішне проведення ГРП потребує інтеграції міждисциплінарних знань з гідродинаміки, механіки руйнування пласта, матеріалознавства, цифрових технологій та ризик-орієнтованого підходу. Це визначає необхідність дидактичних матеріалів, що поєднують теоретичну підготовку та практичні тренажерні модулі.

3. Визначено основні рівні засвоєння навчального матеріалу, які охоплюють від розуміння базових принципів і характеристик флюїдів до здатності самостійно моделювати процеси ГРП, оцінювати вплив технологічних параметрів та приймати оптимальні інженерні рішення.

4. Практичні вправи та кейс-методи, включені до дидактичного проєкту, забезпечують формування практичних навичок роботи з цифровими симуляторами, аналізу даних, підбору технологічних параметрів і прогнозування ефективності гідравлічного розриву пласта, що підвищує готовність фахівців до виконання завдань у реальних виробничих умовах.

5. Розроблений дидактичний проєкт сприяє підвищенню ефективності підготовки фахівців інженерно-технічного центру, забезпечує комплексний підхід до навчання та створює умови для безпечного та економічно обґрунтованого проведення ГРП, що є ключовим для підвищення продуктивності свердловин та зниження технологічних ризиків.

## ВИСНОВОК

У магістерській кваліфікаційній роботі обґрунтовано актуальність професійної підготовки фахівців інженерно-технічних центрів до моделювання гідравлічного розриву пласта як одного з ключових чинників забезпечення безпеки, ефективності та інноваційного розвитку технологій інтенсифікації видобування в сучасних умовах нафтогазової галузі. Доведено, що вдосконалення системи підготовки інженерно-технічного персоналу є необхідною передумовою впровадження науково обґрунтованих і технологічно виважених рішень при проектуванні та супроводі гідравлічного розриву пласта.

У межах науково-методичного аналізу розрахунку проектного коефіцієнта видобування нафти та методів моделювання гідравлічного розриву пласта встановлено, що найбільш обґрунтовані результати забезпечує комплексне застосування сучасних розрахункових методик у поєднанні з удосконаленими моделями гідравлічного розриву пласта. Такий підхід дозволяє адекватно враховувати геолого-фізичні особливості колекторів, динамічні зміни їх фільтраційних властивостей і вплив технологічних параметрів геолого-технічних заходів, що в цілому сприяє підвищенню ефективності розробки нафтових родовищ, достовірності прогнозів та обґрунтованості проектних рішень.

Обґрунтовано вимоги до кадрового забезпечення інженерно-технічних центрів нафтової промисловості, які виконують роботи з моделювання гідравлічного розриву пласта. Показано, що ефективне функціонування таких центрів має базуватися на поєднанні ґрунтовної теоретичної підготовки, практичного досвіду, володіння сучасними інструментами моделювання та здатності фахівців до міждисциплінарної взаємодії. Реалізація цих вимог безпосередньо впливає на якість проектних рішень, ефективність геолого-технічних заходів і рівень видобування нафти.

У межах роботи розроблено дидактичний проєкт викладання теми «Моделювання гідравлічного розриву пласта», що застосовується у процесі підвищення кваліфікації фахівців інженерно-технічних центрів. Запропонований проєкт забезпечує системний і практикоорієнтований підхід до навчання, сприяє формуванню професійних компетентностей та створює умови для безпечного, технічно та економічно обґрунтованого проведення гідравлічного розриву пласта.

Узагальнюючи результати дослідження, встановлено, що інтеграція сучасних методів моделювання гідравлічного розриву пласта з удосконаленою системою професійної підготовки фахівців інженерно-технічних центрів є ключовою умовою підвищення ефективності розробки нафтових родовищ, зниження технологічних ризиків та забезпечення сталого розвитку нафтогазової галузі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Головенкін В. П. Інженерна педагогіка [Електронний ресурс] : підруч. / В. П. Головенкін. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. Режим доступу: [http://psy.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/02/Injenerna\\_pedagogika.pdf](http://psy.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/02/Injenerna_pedagogika.pdf)
2. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: дидактичне проектування: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УПА, 2019. – 204 с.
3. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: основні технології навчання: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УПА, 2019. – 174 с.
4. Лебедик Л.В., Стрельников В.Ю., Стрельников М.В. Сучасні технології навчання і методики викладання дисциплін: Навчально-методичний посібник для слухачів курсів підвищення кваліфікації педагогічних працівників закладів середньої, професійної (професійно-технічної), фахової передвищої та вищої освіти / Л. В. Лебедик, В. Ю. Стрельников, М. В. Стрельников. – Полтава : АСМІ, 2020. – 303 с.
5. Методика професійної освіти : навч. посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 015 «Професійна освіта» галузі знань 01 «Освіта / Педагогіка» / Д. О. Чернишев, К. І. Почка, Г. Л. Корчова, Ю. С. Красильник, М. В. Руденко. – Київ : Компринт, 2024. – 224 с.
6. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи для здобувачів освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 015 Професійна освіта (за спеціалізацією) / Укр. інж.-пед. акад.; упоряд.: О. Е. Коваленко, Н. О. Брюханова, Н.В. Божко, Н.В. Корольова – Харків: УПА, 2024. – 82 с.
7. Семенова А.В. Професійна педагогіка: Підручник. / Авт. : О.В. Грабовський, Л.В. Коломієць, О.С. Савельєва, А.В. Семенова, В.Ф. Яні; за заг. ред. А.В. Семенової. – Одеса: Бондаренко М.О., 2020. – 575 с.

8. Сайт дистанційної освіти Університету – Режим доступу: <https://moodle.karazin.ua>
9. EdEra – студія онлайн-освіти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ed-era.com/>
10. Український освітній онлайн-портал для вчителів «На Урок» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://naurok.com.ua/>
11. «Освіторія Медіа» – онлайн медія про освіта та виховання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://osvitoria.media/>
12. Освіта.UA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://osvita.ua>
13. Всеосвіта – освітня платформа для професійного зростання педагогічних працівників та підвищення їх педагогічної майстерності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vseosvita.ua/>